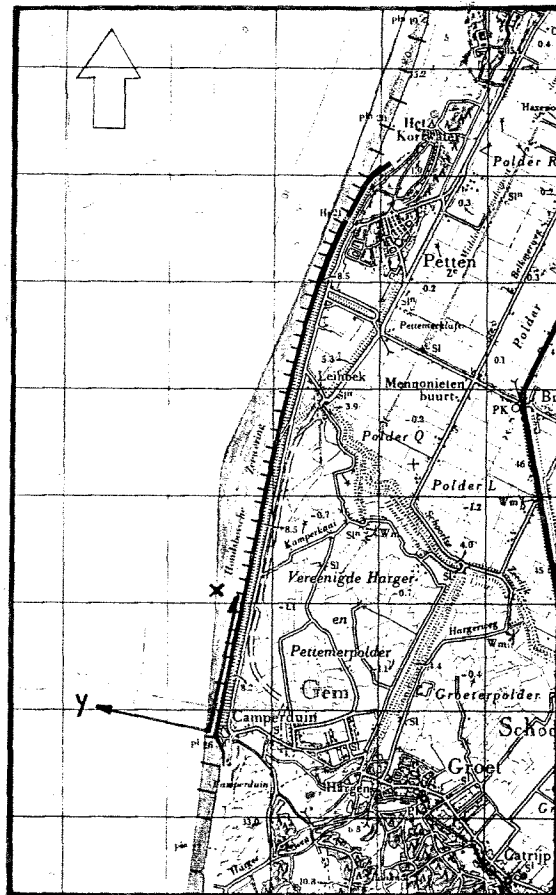


Modelleren van een kunstmatige rivier ter plaatse van de Hondsbossche en Pettemer zeekering

J.Bekooij



Modelleren van een kunstmatige rivier ter plaatse van de Hondsbossche en Pettemer zeewering

Afstudeerverslag van: Jeroen Bekooij

Afstudeercommissie: prof.ir. K. d'Angremond
dr.ir. J. van de Graaff
ir. P. Huisman

Delft, januari 1999

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde
Sectie Waterbouwkunde

Voorwoord

Dit is het eindverslag van mijn afstudeeronderzoek. De afstudeercommissie, bestaande uit prof. ir. K. d'Angremond, dr.ir. J. van de Graaff en ir. P. Huisman, wordt bedankt voor de prettige samenwerking. Met name dr.ir. J. van de Graaff, mijn directe begeleider, wordt bedankt voor zijn deskundige begeleiding. Tevens ben ik dank verschuldigd aan Hessel Voortman die van tijd tot tijd de moeite nam mijn werk onder de loep te nemen.

Delft, 25 januari 1999

Jeroen Bekooij

Inhoudsopgave

1. INLEIDING	1
2. BESCHRIJVING VAN HET STUDIEGEBIED	2
2.1 INLEIDING	2
2.2 GESCHIEDENIS.....	2
2.3 HUIDIGE SITUATIE	5
2.3.1 <i>Ligging van de huidige kustlijn.....</i>	<i>5</i>
2.3.2 <i>Dwarsprofiel.....</i>	<i>7</i>
3. PROBLEEMANALYSE EN PLAN VAN AANPAK.....	10
3.1 INLEIDING	10
3.2 PROBLEEMANALYSE.....	10
3.3 PLAN VAN AANPAK.....	10
4. HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN.....	12
4.1 INLEIDING	12
4.2 HORIZONTAAL EN VERTICAAL GETIJ.....	12
4.3 WINDGOLVEN	13
4.3.1 <i>Windrichtingssectoren.....</i>	<i>13</i>
4.3.2 <i>Golfklimaat van Petten.....</i>	<i>14</i>
5. THEORIE	16
5.1 INLEIDING	16
5.2 LANGSSTROOM EN SEDIMENTTRANSPORT DOOR GETIJ	16
5.3 LANGSSTROOM EN SEDIMENTTRANSPORT DOOR GOLVEN	18
5.4 DE TRANSPORT-KUSTHOEK KROMME	18
5.5 SINGLE-LINE THEORIE	20
5.5.1 <i>Afleiding van de diffusievergelijking.....</i>	<i>20</i>
5.5.2 <i>Analytische oplossing diffusievergelijking.....</i>	<i>22</i>
5.5.3 <i>Numerieke oplossing diffusievergelijking.....</i>	<i>23</i>
5.5.4 <i>Numerieke uitwerking bij een bron.....</i>	<i>24</i>
6. BEREKENING EN VERIFICATIE VAN HET MODEL.....	26
6.1 INLEIDING	26
6.2 BEREKENING TRANSPORT-KUSTHOEK KROMME M.B.V. UNIBEST-LT	26
6.3 VERIFICATIE VAN DE TRANSPORT-KUSTHOEK KROMME	28
6.4 BEREKENING KUSTONTWIKKELING MET BEHULP VAN UNIBEST-CL	30
6.5 VERIFICATIE VAN HET BEREKENDE LANGSTRANSPORT.....	31
7. SUPERPOSITIE VAN TWEE KUSTLIJNEN.....	33
7.1 INLEIDING	33
7.2 SCHEMATISATIE VAN DE KUST ALS RECHTE LIJN	33
7.3 SUPERPOSITIE RECHTE KUSTLIJN EN HUIDIGE KUSTLIJN.....	34
8. GEVOELIGHEIDSANALYSE.....	35
8.1 INLEIDING	35
8.2 ONTWIKKELING VAN DE KUSTLIJN IN DE TIJD	35
8.3 VARIATIE VAN DE PROFIELHOOGTE	36
8.4 VARIATIE VAN DE SUPPLETIEHOEVEELHEID	38
8.5 EFFECT BEËINDIGEN VAN DE SUPPLETIE	41
8.6 METHODE VAN SEDIMENTTOEVOEGING.....	46

9. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	48
LITERATUUR	49
BELANGRIJKSTE SYMBOLEN	50

BIJLAGEN:

- 1: AFLEIDING GOLFKLIMAAT PETTEN
- 2: LANGSTRANSPOORT IN DE BRANDINGSZONE TEN GEVOLGE VAN DE GETIJSTROOM
- 3: LANGSTRANSPOORT IN DE BRANDINGSZONE TEN GEVOLGE VAN EEN
GOLFGEÏNDUCEERDE LANGSSTROOM
- 4: INVLOED VAN HET GETIJ EN DE GOLVEN OP HET SEDIMENTTRANSPORT EN OP
DE TRANSPORT-KUSTHOEK KROMME

1. Inleiding

Het onderwerp van dit afstudeerproject is ontstaan naar aanleiding van een prijsvraag van de gemeente Zijpe. Ter gelegenheid van het 400-jarig bestaan van de Zijpe en Hazepolder werd een prijsvraag uitgeschreven met als onderwerp: "kijk op de kust". Door de TU-Delft, in samenwerking met Alkyon, werd aan de prijsvraag meegedaan. Hun "kijk op de kust" bestond uit het toevoegen van 250.000 m³/jaar sediment aan het kuststelsel voor de Hondsbossche en Pettemer zeewering. Door deze zandtoevoeging zou de zeewering na enkele jaren onder het zand verdwijnen en zou een nieuw recreatiegebied met een breed strand ontstaan. Een onderwerp dat door een afstudeerder nader kon worden onderzocht.

De doelstelling van dit onderzoek is het bepalen van de ligging van de kustlijn ter plaatse van de Hondsbossche en Pettemer zeewering nadat gedurende een aantal jaren kunstmatig sediment is toegevoegd aan het kuststelsel. Tevens moet een methode worden uitgewerkt waarmee het sediment kunstmatig aan het kuststelsel kan worden toegevoegd.

De opbouw van dit rapport is als volgt. In hoofdstuk 2 wordt een beschrijving gegeven van het studiegebied. Uit de geschiedenis van het studiegebied kan worden opgemaakt wat voor veranderingen het gebied in de loop van de tijd heeft ondergaan. In hoofdstuk 3 wordt de probleemanalyse en het plan van aanpak beschreven. De hydraulische randvoorwaarden worden beschreven in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 wordt de theorie beschreven die in het kader van dit onderzoek nodig is om de berekeningen te onderbouwen. Hoofdstuk 6 beschrijft de verificatie van de berekeningen die met het numerieke computerprogramma Unibest zijn uitgevoerd. In hoofdstuk 7 wordt een oplossing beschreven die het mogelijk maakt het Unibest model toe te kunnen passen voor dit onderzoek. Hoofdstuk 8 beschrijft een gevoeligheidsanalyse. In dit hoofdstuk wordt ook beschreven wat het effect is van het plan van sedimenttoevoeging als het elders langs de kust wordt uitgevoerd. Tevens wordt in de laatste paragraaf van dit hoofdstuk een geschikte methode van sedimenttoevoeging beschreven. Hoofdstuk 9 bevat de conclusies en de aanbevelingen.

2. Beschrijving van het studiegebied

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk volgt een beschrijving van het studiegebied. Met betrekking tot dit onderzoek is vooral de positie van de kustlijn van de gesloten Hollandse kust van belang. Voordat tot modellering van een "kunstmatige rivier" wordt overgegaan is het belangrijk het gedrag van de kustlijn in de tijd enigszins te kunnen voorspellen. Kustlijnveranderingen ten gevolge van de theoretisch te creëren "kunstmatige rivier" worden dan niet verward met veranderingen van de kustlijn door andere invloeden.

De geschiedenis van de globale ontwikkeling van de kustlijn in de tijd wordt in paragraaf 2.2 beschreven. In paragraaf 2.3 wordt meer gedetailleerd de huidige situatie van het gebied behandeld. In paragraaf 2.3.1 wordt met behulp van een topografische kaart de ligging van de huidige kustlijn beschreven. In paragraaf 2.3.2 wordt een dwarsprofiel van de kust bij de Hondsbossche en Pettemer zeewering weergegeven.

2.2 Geschiedenis

De gesloten Hollandse kust bestaat bijna volledig uit een gesloten duinenrij. Ter plaatse van de Hondsbossche en Pettemer zeewering ontbreekt, over ruim vijf kilometer lengte, de duinenrij. Vermoedelijk mondde de Rijn, of een zijrivier van de Rijn hier in zee uit, waardoor geen duinvorming kon plaatsvinden. Ongeveer 3500 voor Christus (v.C.) lag de kustlijn 8 km oostelijk van de huidige kustlijn. Dit was het begin van de sluiting van de Hollandse kust, van kustuitbouw en van oude duinvorming. Zie figuur 2.1.

Ongeveer 1000 v.C. hield de kustuitbouw op en begon een periode met kustachteruitgang. De oude Rijnmond hield op te bestaan. Tot vlak voor onze jaartelling heeft ten noorden van IJmuiden vermoedelijk nog wel kustuitbreiding plaatsgevonden. Ongeveer rond het jaartal 1100 vonden de eerste duindoорbraken plaats in de kop van Noord-Holland en begon de vorming van de jonge duinen. De Hondsbossche en Pettemer zeewering werd aangelegd na de St. Elisabethsvloed van 1421 en werd genoemd naar het daarbij verdrinken dorp Hondsbosch. Het huidige dijkensysteem dateert van 1870.

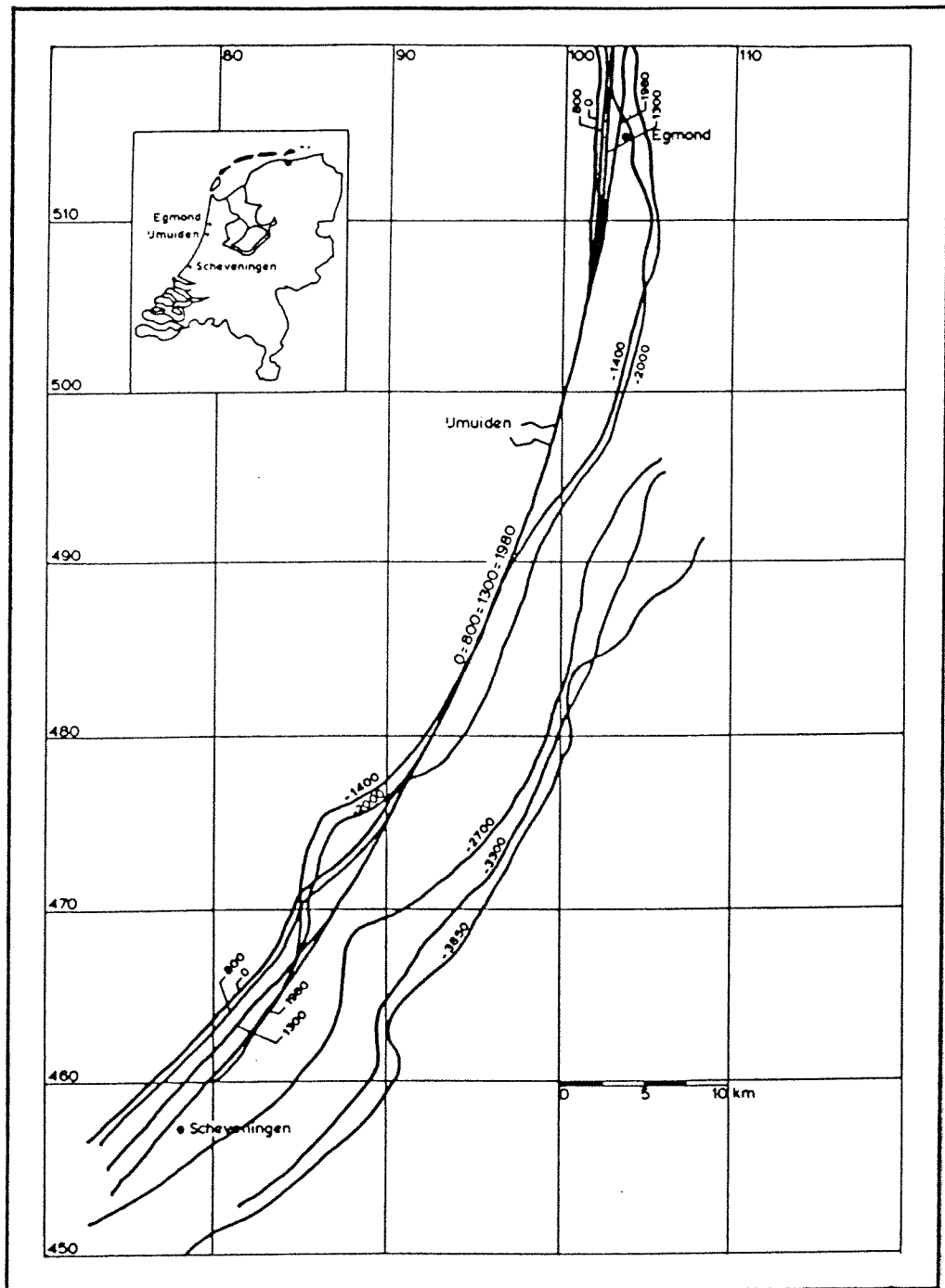


fig.2.1: Ontwikkeling van de kustlijn van 3850 v.C. tot op heden
 (uit: Kustgenese, Fase 1 Hoofdrapport, Stive 1987)

In de periode tussen 1860 en 1890 trad langs de gehele Hollandse kust een sterke kustachteruitgang op. Dit kwam vermoedelijk door een afwijking van het gemiddelde windklimaat. De zuidwesten winden kwamen in die periode vaker voor dan gebruikelijk. De noordwesten winden kwamen minder vaak voor dan gebruikelijk. Omstreeks 1900 had de kust zich echter weer hersteld. Figuur 2.2 geeft een beeld van deze regressieperiode aan de hand van enkele kustgrafieken. De aanduiding km 6 in de figuur duidt op raai 6. Dit is een raai op een afstand van 6 kilometer vanaf Den Helder.

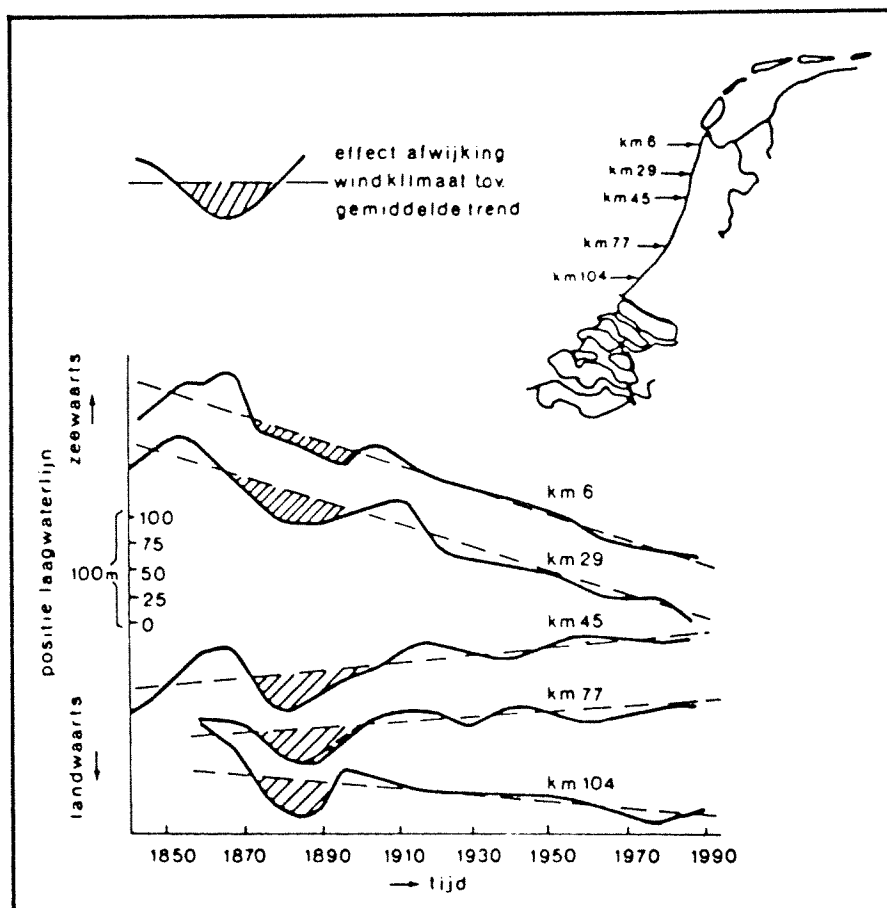


fig.2.2: Effect afwijking windklimaat op de Hollandse kust (uit: Handboek Zandsuppleties, RWS 1988)

Wat betreft de ligging van de kustlijn kan worden gesteld dat de afgelopen 100 jaar kustvoortgang plaatsvindt in het middendeel van de kust en kustachteruitgang aan de uiteinden van de kust. Tussen Den Helder en Callantsoog treedt een achteruitgang op van gemiddeld ongeveer 1,5 m/jaar en tussen Scheveningen en Ter Heide een achteruitgang van ongeveer 0,5 m/jaar. Tussen Bergen en Scheveningen treedt een voortgang op van ongeveer 0,4 m/jaar. Het huidige dijkensysteem van de zeevering dat dateert van 1870 ligt nog steeds op de zelfde plaats. De ligging van de huidige kustlijn wordt in stand gehouden door jaarlijks ongeveer 6 à 7 miljoen m³ zand te suppleren. Dit geldt overigens voor de gehele Nederlandse kust.

De afgelopen 30 jaar is de ligging van de kustlijn in het zuidelijke- en middendeel van de Hollandse kust beïnvloed door de aanleg van Europoort (vanaf 1965) en door de verlenging van de havenhoofden van IJmuiden (1967-1968).

De vanaf 1880 langs kop van Noord-Holland aangelegde strandhoofden lijken de erosieve trend nauwelijks te beïnvloeden. Ook de voor 1985 uitgevoerde suppleties zijn van dien aard geweest dat de invloed van deze suppleties op de langetermijnontwikkeling van de kustlijn niet aantoonbaar is.

2.3 Huidige situatie

2.3.1 Ligging van de huidige kustlijn

Voor het bepalen van de ligging van de huidige kustlijn (laagwaterlijn) zijn diverse opeenvolgende topografische kaarten gebruikt.

De positie van de huidige kustlijn wordt in deze paragraaf vastgelegd in een x- en y-coördinatenstelsel. Veranderingen van de kustlijn ten gevolge van de modellering van een "kunstmatige rivier" kunnen dan gemakkelijk worden beschreven.

Voor de schematisatie, van het gebied ter plaatse van de zeevering, wordt de kustlijn vastgelegd door x- en y-coördinaten. De x-coördinaat begint bij -5.000 m (raai 31) en telt door tot 10.000 m (raai 16) in stappen van 100 m. De oorsprong van het assenstelsel ligt bij het eerste, meest zuidelijke, strandhoofd van de zeevering (raai 26). De x-richting is evenwijdig aan de Hondsbossche zeevering. Dit is 12 graden oost ten opzichte van het kaartnoorden. De positieve y-as staat loodrecht zeewaarts gericht op de x-as. Zie figuur 2.3.

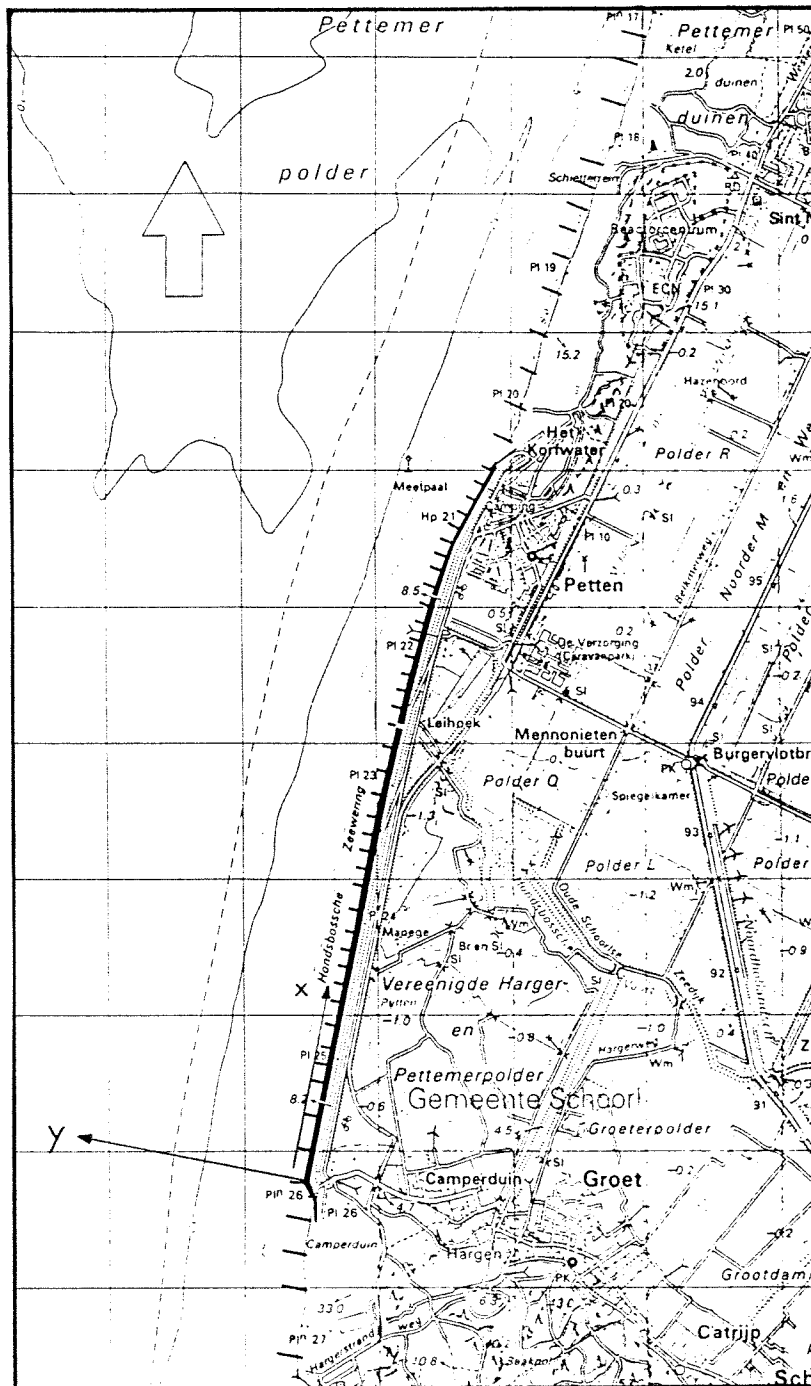


fig.2.3: De Hondsbossche en Pettemer zeewering, het eerste strandhoofd wordt als oorsprong van het assenstelsel gebruikt (uit: Topografische kaart, Topografische Dienst 1971)

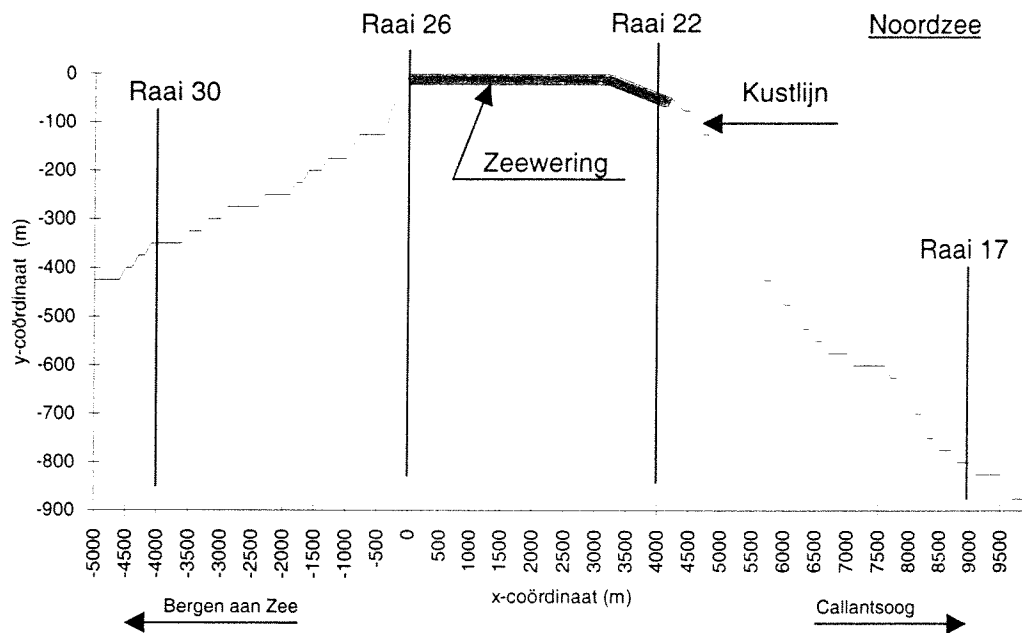


fig.2.4: Schematisatie van de huidige kustlijn tussen raai 17 en raai 30 (in deze figuur is een verschillende x- en y-schaal toegepast)

De geschematiseerde kustlijn is te zien in figuur 2.4. In deze figuur is een verschillende x- en y-schaal toegepast. De zeewering ligt meer zeewaarts dan de meest naastgelegen kustgedeelten. Zoals te zien in bovenstaande schematisatie ligt de zeewering ongeveer 400 m meer zeewaarts dan het zuidelijk kustgebied en ongeveer 900 m meer zeewaarts dan het noordelijk kustgebied. Het lange rechte deel van de zeewering is daarbij als referentielijn aangehouden. De Nederlandse kustlijn is in de loop van de tijd in oostelijke richting verplaatst, de zeewering heeft deze verplaatsing, als enige "harde" kustverdediging van de gesloten Hollandse kust, niet ondergaan.

2.3.2 Dwarsprofiel

De Hondsbossche en Pettemer zeewering ligt tussen Camperduin en Petten in Noord-Holland. De hoogte is ongeveer NAP+11,50 m (Deltahoogte). Feitelijk zijn er twee delen: de eigenlijke Hondsbossche zeewering en de Pettemer zeewering ten noorden daarvan. De totale lengte van de zeewering is ongeveer 5 kilometer. Een algemeen dwarsprofiel van de zeewering is te zien in figuur 2.5.

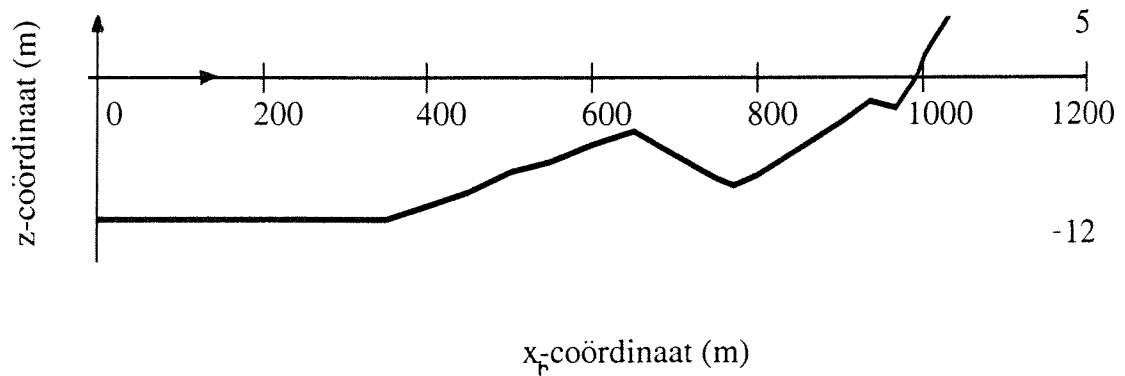


fig.2.6: Schematisatie van het dwarsprofiel van raai 22 ($x=4000$)
(uit: Jaarlijkse lodingen, RIKZ 1986/1991)

Het dwarsprofiel van raai 22 wordt in dit verslag gebruikt als representatief evenwichtsprofiel voor het gehele te beschouwen kustvak. Zie figuur 2.6. Raai 22 ligt ongeveer halverwege de zeekering. De horizontale as is de x_r -as. De oorsprong van deze as ligt 990 m zeewaarts van het punt waar het kustprofiel de hoogte gelijk aan NAP snijdt. Dit profiel wordt in dit onderzoek constant gehouden zowel als afgeleide naar de plaats als naar de tijd.

De hier gebruikte x_r -as is evenwijdig, maar tegengesteld gericht aan de y -as die is gebruikt voor de schematisatie van de kustlijn. De z -as staat loodrecht en verticaal op de x_r -as. De z -coördinaat is nul op NAP. De totale profielhoogte van het geschematiseerde dwarsprofiel is 16,5 m. Van ongeveer NAP-11,5 m tot NAP+5 m.

3. Probleemanalyse en plan van aanpak

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk volgt in paragraaf 3.2 de probleemanalyse. Paragraaf 3.3 geeft uitleg over het plan van aanpak.

3.2 Probleemanalyse

In het midden van de ongeveer vijf kilometer lange Hondsbossche en Pettemer zeewering wordt gedurende een lange reeks van jaren op een kunstmatige manier een hoeveelheid zand aan het kuststelsel toegevoegd. Het kuststelsel zal deze hoeveelheid zand op een of andere wijze herverdelen. Hierdoor wijzigt de ligging van de kustlijn ter plaatse van de Hondsbossche en Pettemer zeewering. Het is uiteraard van belang de ligging van de nieuwe kustlijn theoretisch te bepalen voordat tot zandtoevoeging wordt overgegaan.

3.3 Plan van aanpak

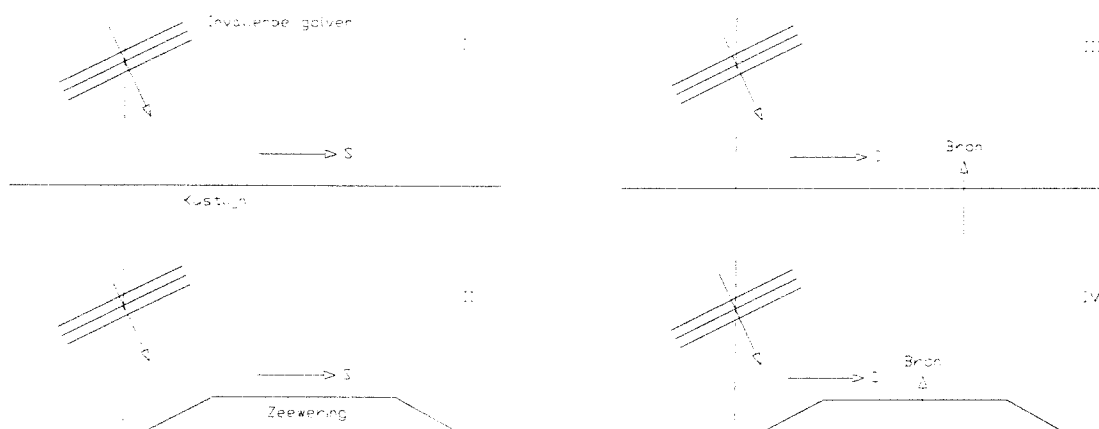


fig.3.1: Aanpak van het probleem

De aanpak van het probleem wordt met behulp van figuur 3.1 toegelicht. In schets I is een bovenaanzicht te zien van een rechte kustlijn met vanuit zee scheef invallende golven. De golven en de getijstroom zullen langs de kust een stroming veroorzaken. Deze langsstroom veroorzaakt een sedimenttransport langs de kust. Gradiënten in dit langstransport veroorzaken erosie of aanzanding langs de kust.

In schets II is de Hondsbossche en Pettemer zeewering schematisch weergegeven. Ook bij dit verloop van de kustlijn zal door de scheef invallende golven en de getijstroom een langstransport aanwezig zijn. Het is niet duidelijk of ten gevolge van de zeewaarts uitstekende zeewering gradiënten in het langstransport aanwezig zullen zijn. Maar zoals bij de beschrijving van het studiegebied reeds aan de orde is geweest ligt de zeewering al vele tientallen jaren op dezelfde plaats. Ook uit de jaarlijkse lodingen van raai 22 (RIKZ 1986/1991) blijkt dat van een wezenlijke wijziging van het

bodemprofiel geen sprake is. Uit dit gegeven kan worden geconcludeerd dat van grote gradiënten in het langtransport geen sprake is.

Wanneer een kunstmatige rivier, of een bron, jaarlijks 250.000 m³ sediment in het kuststelsel brengt zal dit, door golven en stroming, langs de kust verdeeld worden. Omdat het sedimenttransport langs de zeeoever constant is maakt het theoretisch niet uit of bij de berekening van de sedimentverdeling uitgegaan wordt van de situatie zoals getekend in schets III of IV. Met behulp van de Single-line theorie (Pelnard-Considère 1956) kan het beschreven probleem analytisch en numeriek berekend worden. Voor de numerieke berekening wordt gebruik gemaakt van de numerieke modellen Unibest-LT en Unibest-CL.

Er zijn vele methoden waarmee de jaarlijkse sedimenttoevoeging kan worden uitgevoerd. In dit onderzoek zullen enkele alternatieven worden beschreven en tegen elkaar worden afgewogen.

4. Hydraulische randvoorwaarden

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de hydraulische randvoorwaarden voor het gebied beschreven. Dit zijn het horizontaal en verticaal getij en het golfklimaat. Van belang zijn vooral de randvoorwaarden die de langsstroom opwekken. Stromingen loodrecht op de kust worden buiten beschouwing gelaten. In paragraaf 4.2 wordt het horizontaal en het verticaal getij beschreven. Het horizontaal getij veroorzaakt tijdens vloed een noordelijke en tijdens eb een zuidelijke langsstroming. Het horizontaal getij beïnvloedt het langstransport. Het verticaal getij is van minder invloed op het langstransport. In paragraaf 4.3 wordt het golfklimaat beschreven. De windgolven komen uit diverse windrichtingssectoren. Deze voornamelijk korte golven veroorzaken bij een scheve golfinval een stroming langs de kust.

De gegevens die in dit hoofdstuk worden gebruikt, zijn ontleend aan een studie van het Waterloopkundig Laboratorium over het project Kustgenese (Van Rijn et al. 1995) In deze studie zijn gegevens vermeld voor o.a. Callantsoog (raai 14) en Egmond (raai 40). Deze raaien liggen respectievelijk ten noorden en ten zuiden van de Hondsbossche en Pettemer zeewering.

4.2 Horizontaal en verticaal getij

De waterstandsveranderingen ten gevolge van het verticaal getij en de langsstromingen ten gevolge van het horizontaal getij worden in project Kustgenese (Van Rijn et al. 1995) gegeven in stappen van een uur. Door de gegevens van raai 14 en raai 40 te middelen wordt een situatie voor de kust van Petten verkregen. Een laag springtij is in project Kustgenese gekozen als het representatief jaarlijks gemiddelde getij. Project Kustgenese geeft diepte gemiddelde stromingswaarden, die volgen uit berekeningen van het TRIWAQ-model (RWS), op 8 m en 20 m diepte. Alleen de gegevens op 8 m diepte zijn hier van belang.

De stroomsnelheid evenwijdig aan de zeewering, de langsstroom, is van belang. In figuur 4.1 wordt het horizontaal en verticaal getij op 8 m diepte gegeven. De stroomsnelheden ten gevolge van het getij in de richting loodrecht op de zeewering zijn zo klein, ongeveer 0,01 m/s, dat ze niet in de figuur zijn weergegeven. De maximum waterstand is NAP+0,81 m de minimum waterstand is NAP-0,67 m. De maximum langsstroom tijdens vloed is 0,54 m/s de minimum langsstroom tijdens eb is -0,39 m/s.

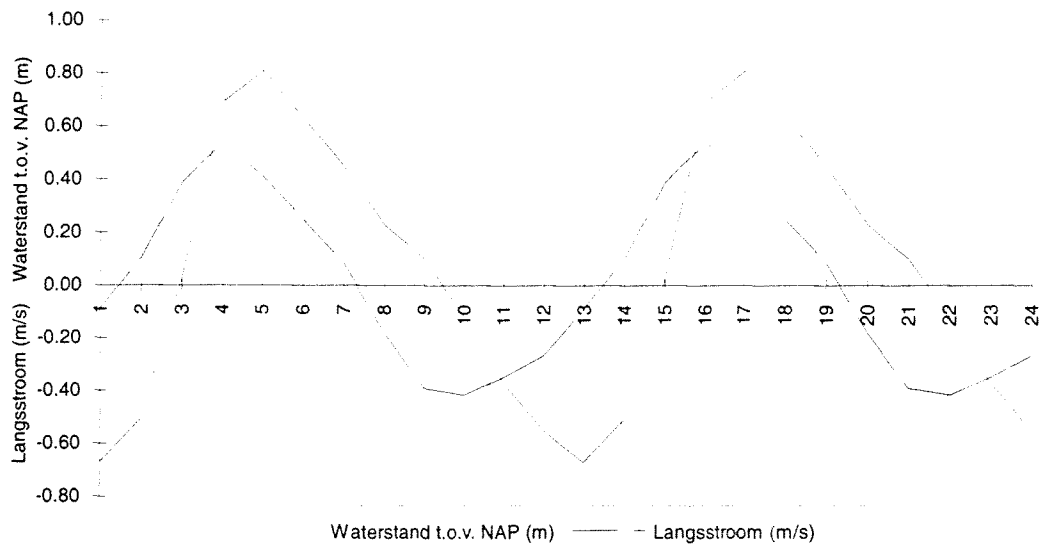


fig.4.1: Waterstanden t.o.v. NAP (m) en langsstroom (m/s) op 8 m diepte

4.3 Windgolven

4.3.1 Windrichtingssectoren

Voor het bepalen van de langsstroming opgewekt door windgolven zijn slechts de golven van belang die zich voortplanten richting de kust. Golven opgewekt door afluandige wind zijn minder belangrijk en worden hier buiten beschouwing gelaten.

In project Kustgenese (Van Rijn et al. 1995) wordt gebruik gemaakt van windrichtingssectoren ten opzichte van het kaartnoorden. In dit onderzoek worden de voortplantingsrichtingen van de golven weergegeven ten opzichte van het rechte zuidelijke deel van de zeewering. Dit deel van de zeewering heeft zoals bij de gebiedsbeschrijving al is beschreven, een oriëntatie van ongeveer 12 graden oost.

De benodigde hoeken van golfval ten opzichte van de normaal op de zeewering liggen tussen -90 en 90 graden. Er wordt gewerkt met vijf windrichtingssectoren van 30 graden, één van 12 graden en één van 18 graden. De gemiddelde richting van een sector wordt gebruikt om de sector te karakteriseren.

De eerste sector heeft een hoek van 12 graden. Deze sector wordt gekarakteriseerd door een hoek van golfval ten opzichte van de normaal op de zeewering van -84 graden. Voor de overige 6 richtingssectoren geldt een zelfde karakterisering. Dit geeft de volgende richtingsverdeling van de hoeken van golfval, zie figuur 4.2. Ten opzichte van de zeewering worden de zeven richtingssectoren gekarakteriseerd door hoeken van golfval tussen -84 en 81 graden.

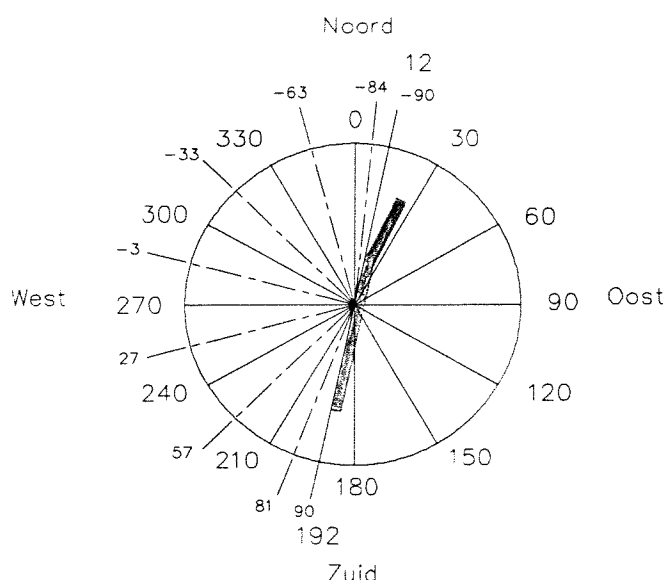


fig.4.2: Verdeling van de hoeken van golfinval in richtingssectoren

4.3.2 Golfklimaat van Petten

In bijlage 1 worden de beschikbare gegevens van raai 14 en raai 40 gebruikt om het golfklimaat van Petten te bepalen. Het golfklimaat van Petten is in figuur 4.3 weergegeven. Gedurende ca. 227 dagen per jaar wordt de kust aangevallen door golven die worden opgewekt door aanlandige wind. 138 Dagen per jaar zijn er geen golven of komen ze uit een andere richting (aflandige wind). In figuur 4.3 is te zien dat de hoogste golven vanuit het westen en noordwesten de kust naderen. In figuur 4.4 is de totale duur van golfinval per richting in een tekening weergegeven. In de figuur wordt geen onderscheid gemaakt in golfhoogte. In figuur 4.4 is te zien dat vanuit het zuidwesten (ongeveer 57 graden ten opzichte van de normaal op de zeevering) de meeste golfaanval plaatsvindt (57,4 dagen per jaar).

Golfklimaat Petten									
Sector t.o.v. kaartnoorden (graden)			0-30	180-210	210-240	240-270	270-300	300-330	330-360
Richting t.o.v. zeevering (graden)			-84	81	57	27	-3	-33	-63
Golfhoogteklasse H_s (m)	H_s (m)	T_p (s)	aantal dagen van voorkomen per jaar						
<0,50	0,25	4,7	1,5	5,8	6,1	4,0	3,2	2,6	1,8
0,50-1,0	0,75	5,3	3,0	13,2	16,3	10,7	7,8	6,5	4,0
1,0-1,5	1,25	5,9	2,2	9,2	13,8	9,9	7,2	6,5	3,7
1,5-2,0	1,75	6,3	1,1	5,1	10,2	7,5	5,4	5,2	2,6
2,0-2,5	2,25	6,8	0,4	2,8	5,9	4,7	3,9	3,4	1,5
2,5-3,0	2,75	7,3	0,2	1,6	3,1	3,0	2,6	2,0	0,9
3,0-3,5	3,25	7,8	0,1	0,7	1,3	1,9	1,7	1,2	0,4
3,5-4,0	3,75	8,3	0,1	0,3	0,6	0,8	1,1	0,6	0,2
4,0-4,5	4,25	8,8	0,0	0,1	0,2	0,6	0,7	0,5	0,1
>4,5	4,75	9,5	0,0	0,0	0,1	0,7	0,9	0,5	0,1
Aantal dagen/jaar			8,6	38,9	57,4	43,7	34,5	29,0	15,2
Totaal aantal dagen/jaar	227,3								

fig.4.3: Golfklimaat van Petten. Het aantal dagen van voorkomen van golfhoogteklasse per richtingsector per jaar

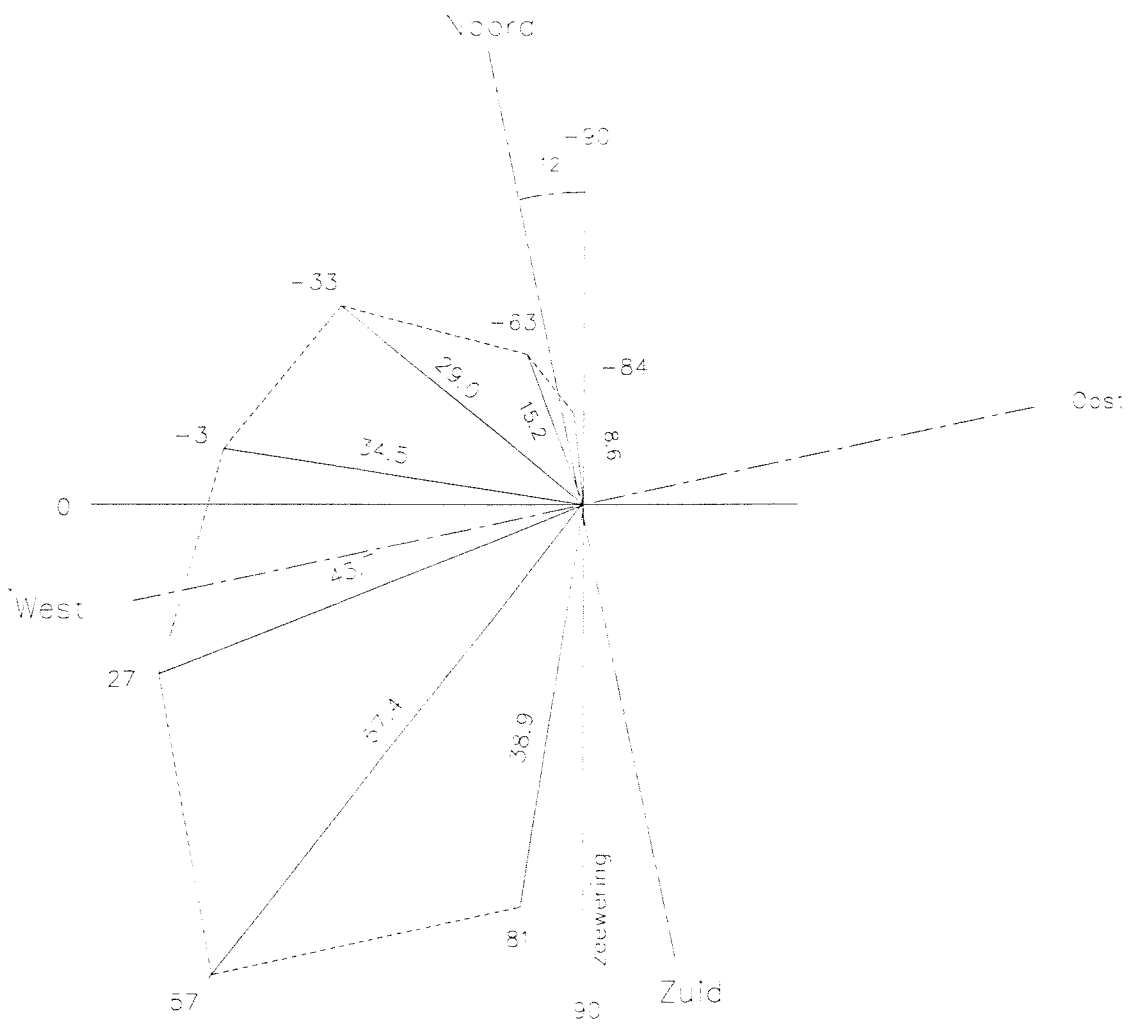


fig.4.4: Totale duur van golfval per richting in dagen per jaar
 (b.v.: 57,4 dagen uit een richting van 57 graden t.o.v. de normaal op de zeewering)

5. Theorie

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de theorie behandeld die nodig is voor de onderbouwing van de uitgevoerde berekeningen. Paragraaf 5.2 beschrijft de langsstroom opgewekt door het getij en het sedimenttransport dat wordt veroorzaakt door deze langsstroom. Paragraaf 5.3 beschrijft het ontstaan van een golfgeïnduceerde langsstroom en het hierdoor opgewekte langstransport. In paragraaf 5.4 wordt de transport-kusthoek kromme beschreven. In paragraaf 5.5 volgt de beschrijving van de Single-line theorie. De diffusievergelijking die de Single-line theorie beschrijft kan zowel analytisch als numeriek worden opgelost. In paragraaf 5.5.2 en paragraaf 5.5.3 worden deze oplossingen beschreven. In paragraaf 5.5.4 wordt een meer gedetailleerde beschrijving gegeven van de toepassing van de Single-line theorie bij een "kunstmatige rivier" of bron.

5.2 Langsstroom en sedimenttransport door getij

Langs de kust is vrijwel altijd een stroming aanwezig. Deze langsstroom wordt veroorzaakt door de getijgolf die een verschil in waterstand in de langsrichting van de kust veroorzaakt. De eendimensionale bewegingsvergelijking van een getijgolf die zich voortplant langs de kust is:

$$-\frac{\partial V}{\partial t} - V \frac{\partial V}{\partial x} - g \frac{\partial Z}{\partial x} = \frac{gV|V|}{C^2 h}$$

Waarin:	C	:Chézy coëfficiënt
	g	:zwaartekracht versnelling
	h	:waterdiepte
	V	:dieptegemiddelde stroomsnelheid
	x	:x-coördinaat langs de kust
	Z	:waterstandverandering t.g.v. getij
	t	:tijd

De drie linkertermen zijn de stroomdrijvende krachten en de rechterterm is een weerstandsterm.

Het verticaal getij kan in een simpele beschouwing worden benaderd met:

$$Z = \hat{Z} \cdot \cos(\Omega t - kx)$$

Waarin:	\hat{Z}	:getijamplitude
	k	:golfgetal $k=2\pi/L$
	L	:getijgolf lengte
	Ω	:getijfrequentie $\Omega=2\pi/T'$
	T'	:getijperiode

En het horizontaal getij kan dan worden benaderd met:

$$V = \hat{V} \cdot \sin(\Omega t - kx - \varphi)$$

Waarin: \hat{V} : amplitude van de getijstroom
 φ : faseverschil tussen verticaal en horizontaal getij

Na enige rekenkundige bewerkingen en verwaarlozing van lagere orde termen resulteert voor de drijvende kracht ten gevolge van het getij:

$$F \approx -\rho h [\hat{V} \Omega \cos(\Omega t - kx - \varphi) + gk \hat{Z} \sin(\Omega t - kx)]$$

Wanneer de langsstroom op gang is gekomen maakt deze kracht evenwicht met de bodemwrijving. Deze complexe beschrijving van de langsstroom zal in dit onderzoek niet worden toegepast.

Een benadering van de snelheidsverdeling loodrecht op de kust van de langsstroom kan worden verkregen door toepassing van de formule van Chézy (5.1).

$$V = C\sqrt{hi} \tag{5.1}$$

Waarin: V : dieptegemiddelde stroomsnelheid (m/s)
C : Chézy coëfficiënt (m^{1/2}/s)
h : waterdiepte (m)
i : verhang (-)

Het verhang i van het wateroppervlak loodrecht op de kust wordt langs de kust gelijk verondersteld. Verondersteld wordt ook dat C slechts weinig varieert met de waterdiepte. De snelheidsverdeling van de dieptegemiddelde stroomsnelheid loodrecht op de kust varieert dan met \sqrt{h} . Het snelheidsprofiel kan nu worden vastgelegd door een dieptegemiddelde stroomsnelheid V op te geven op een bepaalde waterdiepte h.

In bijlage 2 is een rekenvoorbeeld, gedeeltelijk overgenomen uit collegehandleiding f7 (v.d. Velden 1994), gegeven van de langsstroomverdeling en het sedimenttransport voor de kust ten gevolge van een getijstroom. Het dwarsprofiel is in deze berekening geschematiseerd als een recht bodemprofiel met een helling van 1:100. Voor de transportberekening wordt gebruik gemaakt van de transportformule van Bijker. De berekening is uitgevoerd om na te gaan of op deze wijze dezelfde orde van grootte van langstransport wordt gevonden als volgt uit berekening met behulp van het Unibest rekenmodel.

In het rekenmodel Unibest-LT wordt een zelfde snelheidsverdeling toegepast. De formule van Chézy bepaalt ook hier de snelheidsverdeling van de dieptegemiddelde stroomsnelheid loodrecht op de kust. Het snelheidsprofiel wordt vastgelegd door een dieptegemiddelde snelheid op te geven op een bepaalde referentie diepte.

Met dezelfde getijstroomgegevens, dieptegemiddelde snelheid op een referentiediepte en bodemprofiel, komen de snelheidsprofielen berekend met MathCad en met Unibest-LT goed overeen. De berekende sedimenttransporten, met behulp van de transportformule van Bijker zijn gelijk indien in de MathCad berekening voor de Bijker-coëfficiënt ongeveer 4 wordt aangehouden.

5.3 Langsstroom en sedimenttransport door golven

Golven die de kust naderen met een hoek ten opzichte van de normaal op de kust veroorzaken in de brekerzone, de zone waar de golven energie verliezen, een stroming. Dit is de golfgeïnduceerde langsstroom.

Deze langsstroom is het gevolg van de golfspanning. Golfspanning is gedefinieerd als de bijdrage van de golven aan de horizontale overdracht van horizontale impuls. Golfspanning is een kracht per eenheid van breedte (N/m) (Battjes 1986). De kustwaartse gradiënt van de golfspanningscomponent evenwijdig aan de kust is de aandrijvende kracht van de langsstroom. Deze aandrijvende kracht maakt evenwicht met o.a. de bodemweerstand.

In bijlage 3 is een rekenvoorbeeld, gedeeltelijk overgenomen uit collegehandleiding f7 (v.d. Velden 1994), gegeven voor de bepaling van het golfgeïnduceerde langsstroomprofiel in de brekerzone. De berekening maakt gebruik van de lineaire golftheorie. Het dwarsprofiel is in deze berekening geschematiseerd als een recht bodemprofiel met een helling van 1:100. In dit rekenvoorbeeld wordt tevens met behulp van de transportformule van Bijker het sedimenttransport in de brekerzone berekend. Ook deze berekeningen zijn bedoeld om de resultaten te vergelijken met die van het Unibest rekenmodel.

Het model Unibest-LT berekent bij dezelfde schematisatie van het bodemprofiel een geheel ander snelheidsprofiel en een kleiner, factor 1,5, sedimenttransport. Voor de Bijker-coëfficiënt wordt in de MathCad berekening 2 aangehouden. De verschillen ontstaan doordat Unibest-LT niet met de lineaire golftheorie werkt. De in Unibest-LT toegepaste golftheorie is het Random Wave Propagation and Decay Model (Battjes en Janssen 1978). De diepwater golfgegevens worden getransformeerd richting de kust met inachtnamen van energie veranderingen ten gevolge van bodemrefractie, shoaling en dissipatie door golfbreking en bodemwrijving.

5.4 De transport-kusthoek kromme

Het sedimenttransport langs een kust is afhankelijk van de lokale kusthoek. Zoals in de vorige paragraaf is beschreven is de langsstroom in de brandingszone afhankelijk van de hoek van golfinval. Vallen de golven loodrecht in op de kust dan zal er geen golfgeïnduceerde langsstroom zijn. Vallen de golven in onder een hoek van 40 à 45 graden met de normaal op de kust dan zal er een maximale langsstroom zijn. De grootte van de langsstroom heeft direct invloed op de mate van sedimenttransport.

Door bij een rechte kust de golven onder verschillende hoeken te laten invallen, kan het sedimenttransport berekend worden als functie van de hoek van golfinval. Een dergelijke berekening is mogelijk met behulp van de MathCad voorbeeld berekening van bijlage 3.

Unibest-LT berekent de transport-kusthoek kromme op een andere wijze. Hier wordt de kusthoek veranderd ten opzichte van de onder een bepaalde hoek invallende golven. De golven naderen vanuit diep water de kust. Op een bepaalde, op te geven, grens begint de aangenomen transportzone. Op deze grens wordt bij de inmiddels door refractie afgebogen hoek van de golfstraal de veranderde kusthoek gesommeerd. Vanaf deze grens tot aan de kust wordt dan het sedimenttransport berekend. Unibest-LT heeft de mogelijkheid de kusthoek te variëren tussen -90 en +90 graden.

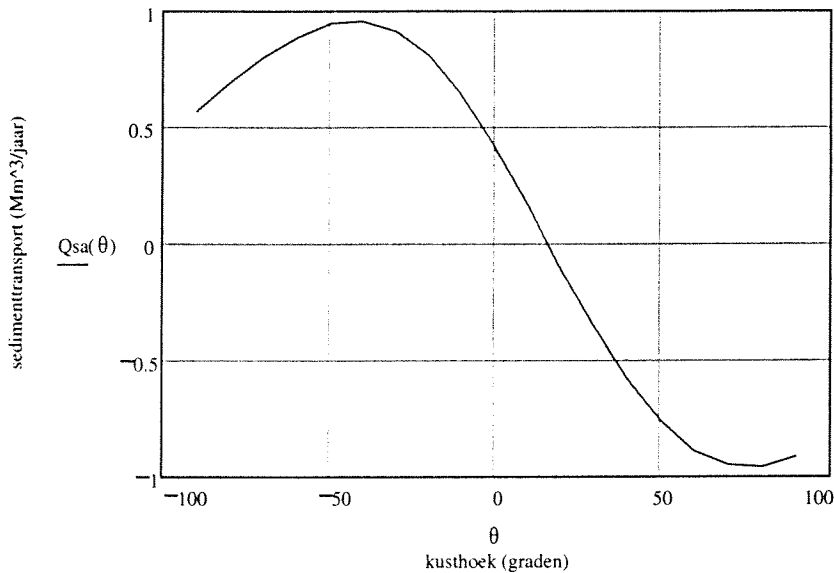


fig.5.1: Een transport-kusthoek kromme berekend met behulp van Unibest-LT

Het sedimenttransport wordt per kusthoek en per golfhoogteklasse berekend in m³/s. Dit is het sedimentvolume inclusief poriën dat per seconde een doorsnede loodrecht op de kust passeert. Deze waarde wordt vermenigvuldigd met de duur van voorkomen van de golfhoogteklasse. Het totale sedimentvolume van alle golfklassen per kusthoek wordt genormaliseerd over 365 dagen. Wordt het golfklimaat van Petten, zoals beschreven bij de hydraulische randvoorwaarden, ingevoerd in Unibest-LT dan berekent dit programma de transport-kusthoek kromme.

In figuur 5.1 is een transport-kusthoek kromme weergegeven. Dit is de transport-kusthoek kromme die gebruikt zal gaan worden bij de berekeningen. Bij een kusthoek van nul graden zal jaarlijks een langstransport van ongeveer 400.000 m³ in noordelijke richting aanwezig zijn.

De door Unibest-LT numeriek berekende transport-kusthoek kromme wordt analytisch benaderd door vergelijking (5.2). De evenwichtshoek en de coëfficiënten C₁ en C₂ worden in Unibest-LT bepaald met behulp van de methode van de kleinste kwadraten. Als de kusthoek gelijk is aan de evenwichtshoek is er theoretisch geen langstransport.

$$Q_{sa}(\theta) = C_1 \times \theta_r \times e^{-(C_2 \times \theta_r)^2} \quad (5.2)$$

Waarin:	Q _{sa} (θ)	:sedimenttransport	(Mm ³ /jaar)
	θ _r =θ-θ _e	:relatieve kusthoek	(graden)
	θ	:kusthoek	(graden)
	θ _e	:evenwichtshoek	(graden)
	C ₁	:coëfficiënt	(Mm ³ /jaar*graden)
	C ₂	:coëfficiënt	(graden ⁻¹)

5.5 Single-line theorie

5.5.1 Afleiding van de diffusievergelijking

De Single-line theorie werd voor het eerst gepresenteerd door Pelnard-Considère (1956). In deze paragraaf wordt de Single-line theorie toegelicht. Voor de beschrijving van de theorie zijn twee vergelijkingen nodig. De continuïteitsvergelijking en de bewegingsvergelijking.

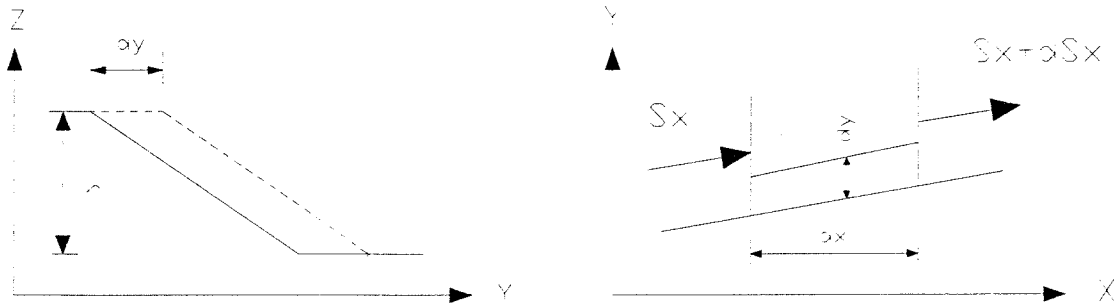


fig.5.2: Dwarsprofiel en continuïteitsrelatie

In figuur 5.2 is een schematisatie van het dwarsprofiel en de schematisatie van de continuïteitsvergelijking te zien. De p en n veranderingen in het sedimenttransport. Dit dwarsprofiel is het evenwichtprofiel. Dit profielhoogte h is de hoogte waarover het dwarsprofiel verandert ten gevolge van gedeelte schuift naar voren of naar achteren als aanzanding of erosie optreedt maar verandert niet van vorm.

In de schematisatie van de continuïteitsvergelijking is te zien dat de instroom van sediment min de uitstroom van sediment de hoeveelheid opgeslagen sediment is (5.3).

$$S_x \cdot dt - (S_x + dS_x) \cdot dt = h \cdot dx \cdot dy \quad (5.3)$$

Waarin:	h	:profielhoogte	(m)
	dt	:tijdstap	(s)
	S_x	:langstransport in x	(m^3/s)
	$S_x + dS_x$:langstransport in $x + dx$	(m^3/s)

Bovendien geldt:

$$dy = \frac{\partial y}{\partial t} \cdot dt \quad \text{en} \quad dS_x = \frac{\partial S_x}{\partial x} dx \quad (5.4) \quad \text{en} \quad (5.5)$$

Na substitutie van de vergelijkingen (5.4) en (5.5) in (5.3) volgt de continuïteitsvergelijking (5.6).

$$\frac{\partial S_x}{\partial x} + h \cdot \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (5.6)$$

De bewegingsvergelijking is afhankelijk van de verandering van het sedimenttransport langs de kust $\partial S_x / \partial x$. Verondersteld wordt dat de verandering van het

sedimenttransport langs de kust alleen verandert door een verandering van de hoek van golfinval ten opzichte van de kusthoek. Lokaal worden rechte en evenwijdige dieptelijnen verondersteld. Het golfklimaat en het dwarsprofiel variëren niet langs het beschouwde kustvak.

Het blijkt uit berekening van de transport-kusthoek kromme met behulp van de transportformule van Bijker dat bij kleine kusthoeken het transport als functie van de kusthoek bij benadering lineair is. De transport-kusthoek kromme kan voor kleine kusthoeken worden vervangen door een rechte lijn. De bewegingsvergelijking is dan (5.7):

$$\frac{\partial S_x}{\partial \varphi} = s_x \quad (5.7)$$

Via de kettingregel kan (5.7) worden geschreven als:

$$\frac{\partial S_x}{\partial x} = \frac{\partial S_x}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (5.8)$$

Aangenomen is dat $\partial \varphi$ klein is. In dat geval is $\partial \varphi = -\partial y / \partial x$ en:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (5.9)$$

De continuïteitsvergelijking (5.6) en de bewegingsvergelijking (5.7) kunnen worden gecombineerd door substitutie van vergelijking (5.7) en (5.9) in (5.8). Dit geeft vergelijking (5.10).

$$\frac{\partial S_x}{\partial x} = -s_x \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (5.10)$$

Substitutie van vergelijking (5.10) in de continuïteitsvergelijking (5.6) geeft de zogenaamde diffusievergelijking (5.11).

$$s_x \cdot \frac{\partial y^2}{\partial x^2} + h \cdot \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (5.11)$$

Deze differentiaalvergelijking kan worden opgelost indien een beginvoorwaarde, de vorm van de kustlijn op $t=0$, en twee randvoorwaarden, het sedimenttransport als functie van de tijd op twee verschillende plaatsen, bekend zijn.

Indien in de continuïteitsvoorwaarde een bron q_b wordt toegevoegd krijgt de diffusievergelijking er een term erbij (5.12).

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{s_x}{h} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + q_b \quad (5.12)$$

5.5.2 Analytische oplossing diffusievergelijking

De diffusievergelijking (5.12) kan worden opgelost indien een beginvoorwaarde, de vorm van de kustlijn op $t=0$, en twee randvoorwaarden, het sedimenttransport als functie van de tijd op twee verschillende plaatsen, bekend zijn. In deze paragraaf worden twee analytische oplossingen met betrekking tot dit onderzoek beschreven.

Bakker (1977) geeft voor een "delta met constante zandaanvoer", in dit onderzoek een bron of een kunstmatige rivier genoemd, de volgende oplossing, vergelijking (5.13).

$$Oy_{\max} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot q_b \cdot \frac{1}{\sqrt{s_x \cdot h}} \cdot \sqrt{t} \quad (5.13)$$

Waarin:	Oy_{\max}	:maximum kustlijnverplaatsing	(m)
	q_b	:bron	(m ³ /jaar)
	s_x	:evenredigheidsconstante	(m ³ /rad*jaar)
	h	:profielhoogte	(m)
	t	:tijd	(jaar)

Voor de ontwikkeling van de kustlijn, nadat een zandtoevoeging is gedaan in de vorm van een Gausskromme, geldt vergelijking (5.14). In hoofdstuk 8 zullen beide vergelijkingen worden toegepast.

$$y = \frac{V}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot \frac{s_x}{365} \cdot h \cdot (t+T)}} \exp\left(-\frac{x^2 \cdot h}{4 \cdot \frac{s_x}{365} \cdot (t+T)}\right) \quad (5.14)$$

Waarin:	y	:y-coördinaat	(m)
	x	:x-coördinaat	(m)
	V	:volume zandtoevoeging	(m ³)
	s_x	:evenredigheidsconstante	(m ³ /rad*jaar)
	h	:profielhoogte	(m)
	T	:tijdconstante	(dagen)
	t	:tijd	(dagen)

5.5.3 Numerieke oplossing diffusievergelijking

In Unibest-CL worden de Single-line theorie vergelijkingen numeriek opgelost. De bewegingsvergelijking wordt gevormd door de kusthoek relatie tezamen met de transport-kusthoek kromme. De kustvergelijkingen zijn (5.15) en (5.16).

$$h_p \cdot \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} + q_b = 0 \quad (\text{continuïteitsvergelijking}) \quad (5.15)$$

$$\theta_g = \frac{\partial y}{\partial x} \quad (\text{kusthoek relatie}) \quad (5.16)$$

Waarin:	$Q_s = Q_s(\theta, x, y, t)$:	: langtransport	(m ³ /jaar)
	$h_p = h_0(x)$: lokale actieve profielhoogte	(m)
	$q_b = q_b(x, t)$: lokale bron of put	(m ² /jaar)
	x	: coördinaat evenwijdig kust	(m)
	y	: kustlijnpositie	(m)
	θ	: kusthoek	(rad)
	$\theta_g = \tan(\theta)$: $\partial y / \partial x$, de kusthoek	(-)
	t	: tijd	(jaar)

In de langsricting van het model, de x-richting, is een "staggered grid" gedefinieerd. De hoofdpunten zijn de x-punten. Tussen de x-punten ($x_i, i=1, n$) zijn de x^y -punten ($x^y_k, k=1, n-1$) gedefinieerd. Op de x_i -punten wordt het langtransport Q_s berekend. Q_s Volgt via de transport-kusthoek kromme uit de kusthoekrelatie. Per tijdstap dt kan de kustlijn zich verplaatsen in de y-richting. De numerieke schema's van de kustvergelijkingen zijn:

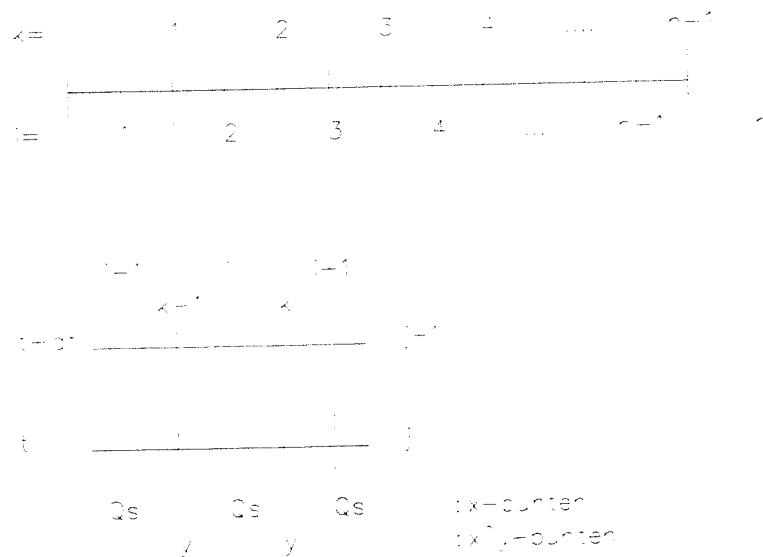


fig.5.3: Schema's van de kustvergelijkingen

$$hO_k \cdot \frac{y_k^{j+1} - y_k^j}{dt} + \frac{Qs_{i+1}^{j+1} - Qs_i^{j+1}}{x_{i+1} - x_i} + \frac{qb_k^{j+1}}{x_{i+1} - x_i} \quad k=1, n-1 \quad (5.17)$$

$$\theta_{g_i}^{j+1} = \frac{y_k^{j+1} - y_{k-1}^{j+1}}{x_k^y - x_{k-1}^y} \quad i=2, n-1 \quad (5.18)$$

De gediscretiseerde kustvergelijkingen zijn (5.17) en (5.18). Voor de randvoorwaarden op $x=0$ en $x=L$ kan worden gekozen uit drie opties:

1. $Q_s(t)$: een constante waarde of een functie van de tijd,
2. $\partial y / \partial t = 0$: wat betekent dat $\partial Q_s / \partial x = 0$,
3. $\partial \theta / \partial t = 0$: wat betekent dat $Q_s(t)$ constant blijft.

De drie opties bieden de mogelijkheid aan de randen van het model sediment in te brengen of uit te voeren. De eerste optie biedt de mogelijkheid om direct een waarde op te geven. De tweede optie laat de randen het sedimenttransport behouden dat ze volgens de schematisatie behoren te hebben. De kusthoek blijft aan de randen gelijk en bovendien verplaatst de kust zich daar niet in de y -richting. De derde optie is gelijk aan de tweede, maar hier verplaatst de kustlijn wel mee, afhankelijk van de kustontwikkeling van het te simuleren gebied.

In het model van de Hondsbossche en Pettemer zeewering zijn alleen optie twee en drie, beperkt, bruikbaar. Het sedimenttransport aan de randen is afhankelijk van de kusthoek aan de rand. De kusthoek aan de randen is afhankelijk van de schematisatie van de kustlijn aan de randen. In de schematisatie van de zeewering zijn de randen recht. De kustlijn verplaatst zich in dat geval aan de randen niet. Zou aan de randen geen rechte kustlijn worden gemodelleerd dan wordt direct sediment het model in of uit getransporteerd. De schematisatie van de kust is voor het model dus niet ondubbelzinnig.

5.5.4 Numerieke uitwerking bij een bron

Met behulp van figuur 5.4 wordt de verdeling van het sediment beschreven bij een bron. Het betreft een bron in een recht kustvak. In schets I is een dwarsprofiel weergegeven. Dit dwarsprofiel heeft een breedte dX (m) en een hoogte h (m). Afhankelijk van de hoeveelheid sediment die achterblijft in het dwarsprofiel verschuift de kust zeewaarts met een afstand dY (m). Het in dit profiel opgeslagen sedimentvolume is dan $V = h \cdot dX \cdot dY$ (m^3). In het geval van een bron is dit eerste profiel het "bronprofiel". Dit profiel wordt door de bron in een tijd dt gevuld met een hoeveelheid sediment. In schets II is te zien dat nu een kusthoek dY/dX is ontstaan met het naastgelegen vakje. Tussen deze twee vakjes vindt dus transport plaats volgens de transport-kusthoek kromme. In schets III is te zien dat het volume van het eerste (bronvakje) afneemt en dat de naastgelegen vakjes worden gevuld. In schets IV is de nieuwe situatie te zien.

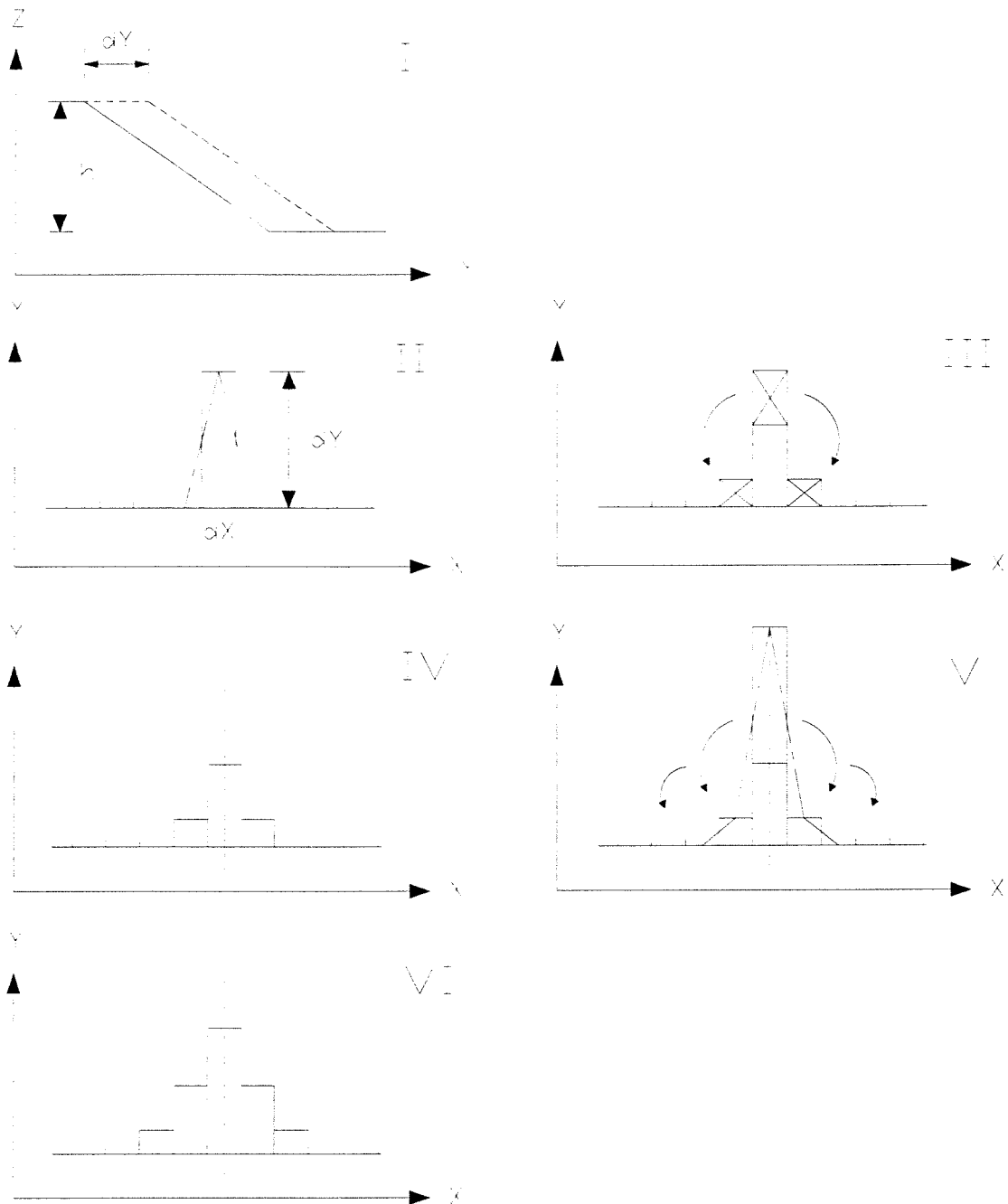


fig.5.4: Beschrijving van een bron met behulp van de Single-line theorie

In de volgende tijdstap dt herhaalt dit proces zich weer. Het bronvakje wordt weer gevuld, schets V. Nu vindt ook transport plaats tussen de naast het "bronvakje" gelegen vakjes en de daarnaast gelegen vakjes. Het resultaat is te zien in schets VI. In het volgende tijdstapje wordt het "bronvakje" opnieuw gevuld en herhaalt het gehele proces zich opnieuw.

Als de rechte kust een andere kushoek heeft dan de evenwichtshoek van de transport-kusthoek kromme zal langs de kust een constant sedimenttransport aanwezig zijn.

Per vakje moet dan een constant volume naar het naastgelegen, bijvoorbeeld noordelijke, vakje worden getransporteerd. Bij kleine kushoeken is dit proces lineair en treedt slechts een verschuiving in de transport-kusthoek kromme op.

6. Berekening en verificatie van het model

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk volgt de berekening en de verificatie van het model. In paragraaf 6.2 wordt de met behulp van Unibest-LT berekende transport-kusthoek kromme beschreven. In paragraaf 6.3 wordt de met behulp van Unibest-LT berekende transport-kusthoek kromme vergeleken met de berekende transport-kusthoek krommen uit de studie Kustgenese Fase 1, Deelrapport V (Zitman 1987).

In paragraaf 6.4 wordt de met behulp van Unibest-CL berekende kustlijnontwikkeling beschreven. Deze door het model berekende kustlijnontwikkeling wordt vergeleken met de werkelijke kustlijnontwikkeling. Paragraaf 6.5 tenslotte beschrijft de verificatie van de berekende langstransporten.

6.2 Berekening transport-kusthoek kromme m.b.v. Unibest-LT

Het golfklimaat dat in Unibest-LT ingevoerd moet worden bestaat uit de volgende onderdelen:

- gemiddelde hoek van inval van een golfveld
- golfpiekperiode van een golfveld
- significante golfhoogte van een golfveld
- duur van een golfveld
- verticaal getij
- horizontaal getij evenwijdig aan het betreffende kustvak gemeten op een bepaalde referentiediepte

Het golfklimaat dat ingevoerd kan worden in Unibest-LT kan uit maximaal 100 golfsituaties bestaan. Het reeds beschreven golfklimaat van Petten (golfklimaat 1) bestaat uit 67 golfsituaties. De waterstandvariaties en de langsstroomvariaties ten gevolge van het getij zouden over deze 67 golfsituaties moeten worden verdeeld. Het getij en de windgolven zijn echter onafhankelijke factoren zodat meer dan 100 combinaties mogelijk zijn.

Het blijkt dat het getij bijna niet van invloed is op het sedimenttransport. Zie bijlage 4. Voor een eerste benadering van de transport-kusthoek kromme wordt daarom het golfklimaat van Petten zonder getij gebruikt.

Unibest-LT maakt onderscheid in een transportzone, de zone waarin sedimenttransport plaatsvindt en de dynamische-zone, de zone waarin aanzanding en erosie kan plaatsvinden. Voor de berekening van de transport-kusthoek kromme zijn de volgende waarden aangehouden. De transportzone begint bij $x_r=250$ m en eindigt bij $x_r =1030$ m (figuur 2.6). De hoogte van de transportzone begint bij NAP-11,5 m en eindigt bij NAP+5 m. De afmetingen van de dynamische-zone zijn gelijk verondersteld aan die van de transportzone.

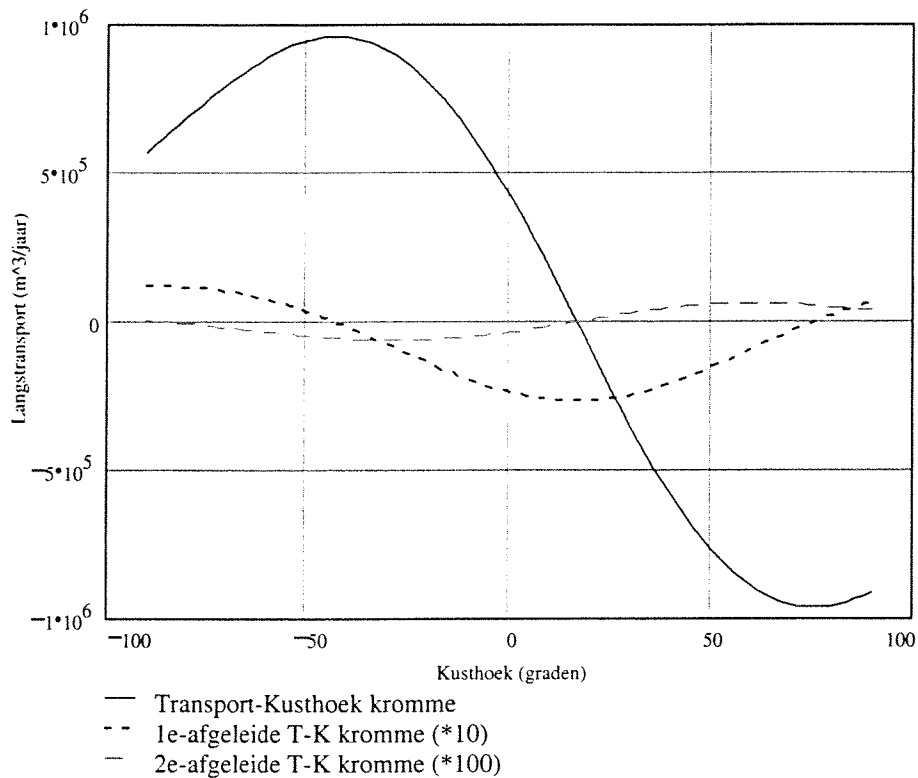


fig.6.1: Transport-kusthoek kromme en afgeleiden (golfklimaat 1)

Een berekening met Unibest-LT levert de transport-kusthoek kromme van figuur 6.1 op. De coëfficiënten van vergelijking (5.2) zijn te zien in figuur 6.2.

golfklimaat	evenwichtshoek θ_e (graden)	C_1	C_2
1	16,6	-0,02666	0,01190

fig.6.2: Coëfficiënten van vergelijking (5.2)

In figuur 6.1 worden ook de eerste afgeleide $dQ_{sa}(\theta)/d\theta$ en de tweede afgeleide $d^2Q_{sa}(\theta)/d\theta^2$ van vergelijking (5.2) weergegeven. De extreme waarden van de transport-kusthoek kromme zijn weergegeven in figuur 6.3.

	Langtransport (m^3 /jaar)	Kusthoek θ (graden)
Maximum	960800	-42,8
Minimum	-960800	76,0

fig.6.3: De extreme waarden van de transport-kusthoek kromme

Het kustsysteem kan gemiddeld maximaal 960800 m^3 sediment per jaar verdelen. De transport-kusthoek kromme heeft een buigpunt waar de tweede afgeleide gelijk aan nul is. Dit buigpunt ligt bij een kusthoek van 16,6 graden. Het langtransport volgens de transport-kusthoek kromme is dan nul. Deze kusthoek, de evenwichtshoek, is het omslagpunt van de langtransportrichting. Bij een kusthoek die kleiner is dan 16,6 graden is het langtransport noordelijk en bij een kusthoek die groter is dan 16,6 graden is het jaarlijks gemiddelde langtransport zuidelijk.

Bij de zeewering, die een kusthoek van nul graden heeft, is het sedimenttransport volgens golfklimaat 1 ca. 425.000 m³/jaar. Dit is het door de golven geïnduceerde langtransport. De getij invloeden zijn hier verwaarloosd.

6.3 Verificatie van de transport-kusthoek kromme

De met golfklimaat 1 berekende transport-kusthoek kromme wordt geverifieerd aan de hand van de gegevens van een andere studie. In de studie Kustgenese Fase 1, Deelrapport V (Zitman 1987), wordt het golfgeïnduceerde langtransport als functie van de kustringing geschat. Dit wordt gedaan voor twee schematisaties van het bodemprofiel en voor drie sedimenttransport formules. Het bodemprofiel is geschematiseerd als een rechte lijn met een helling van 1:100 en als een rechte lijn met een helling van 1:200. De gebruikte sedimenttransport formules zijn van Engelund-Hansen, Bijker en Van Rijn.

In rapport Kustgenese (Zitman 1987) wordt ook het gemiddelde langtransport bepaald over de berekende transporten voor deze zes combinaties van drie transportformules en twee bodemhellingen. Voor de kusthoek van de zeewering $\theta=0$ (Dit is 12 graden oost t.o.v. het kaartnoorden) is het transport met deze formules berekend, figuur 6.4.

transportformule	bodemhelling	langtransport S(θ) (m ³ /jaar) (lineaire benadering)	langtransport met $\theta=0$ (m ³ /jaar)
Engelund-Hansen	1:100	$-862166*(\theta+0,2531) + 155570$	-62621
	1:200	$-736158*(\theta+0,2531) + 136440$	-49862
Bijker	1:100	$-1286940*(\theta+0,2531) + 230728$	-94961
	1:200	$-1180300*(\theta+0,2531) + 215261$	-83441
Van Rijn	1:100	$-547452*(\theta+0,2531) + 83546$	-54999
	1:200	$-329430*(\theta+0,2531) + 52927$	-30443
	gemiddeld:	$-823741*(\theta+0,2531) + 145745$	-62721

fig.6.4: Golfgeïnduceerd langtransport S(θ) (m³/jaar) als functie van de kusthoek θ (radialen) volgens drie transportformules en twee bodemhellingen.
(uit: Kustgenese Fase 1, Deelrapport V, Zitman 1987)

Het blijkt dat het in dit onderzoek berekende jaarlijks gemiddelde langtransport (425.000 m³/jaar) afwijkt van het in het Kustgenese (Zitman 1987) berekende transport (-62.721 m³/jaar). In het Kustgenese rapport zijn niet al de windrichtingsectoren meegenomen in de berekening van het langtransport. In tegenstelling tot in dit onderzoek, waarin zeven windrichtingsectoren worden meegenomen in de berekening, worden in het Kustgenese rapport slechts drie windrichtingsectoren meegenomen in de berekeningen. De verschillen in de vergeleken onderzoeken zijn te verklaren uit de verschillen in de aangenomen oriëntaties van de x-assen. De helling van de berekende transport-kusthoek kromme in het Kustgenese rapport is echter ongeveer gelijk aan de helling van de berekende transport-kusthoek kromme in dit onderzoek. Zie figuur 6.5. Zoals in paragraaf 5.5.4 beschreven is, is het juist de helling van de transport-kusthoek kromme die bepalend is voor de verdeling van het sediment dat wordt toegevoegd door de bron.

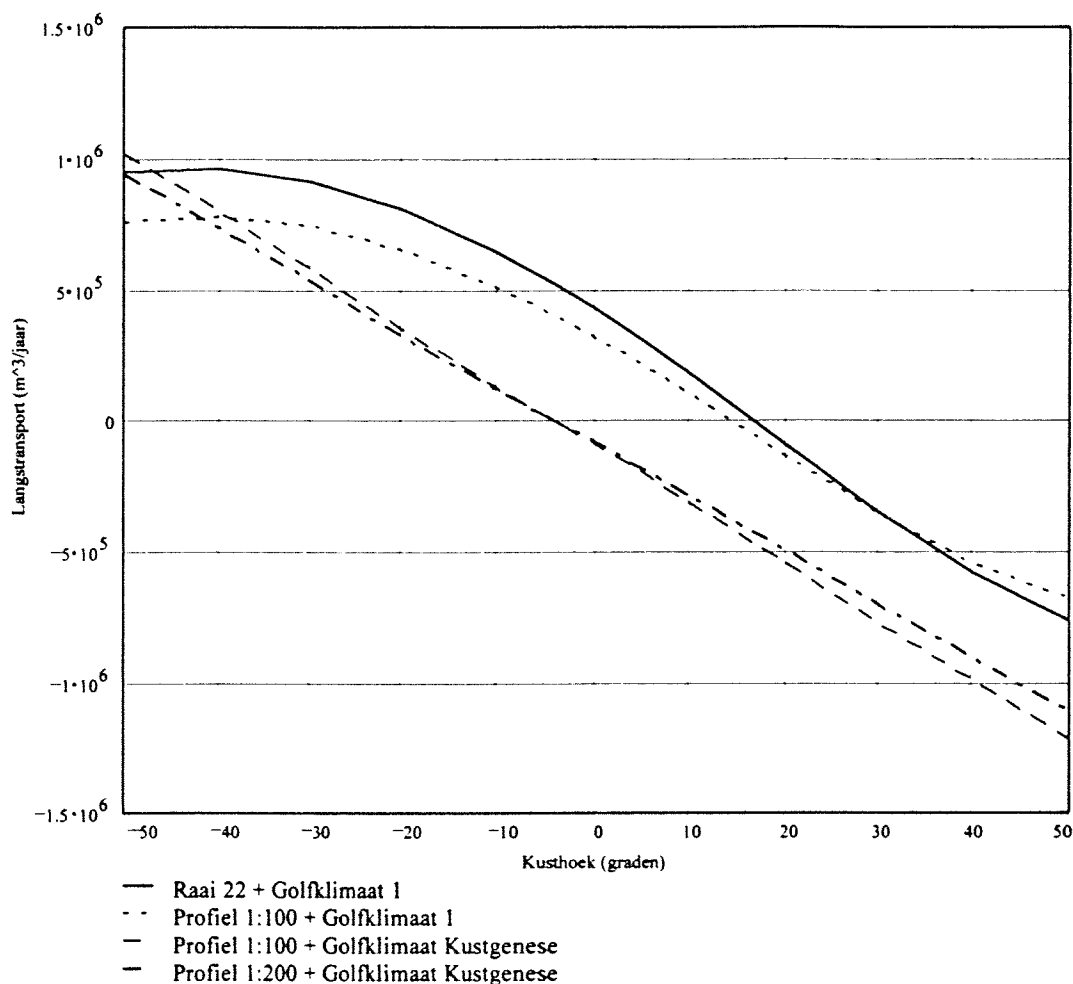


fig.6.5: Verificatie van de berekende transport-kusthoek kromme
(Kusthoek in graden t.o.v. de zeekering; transportformule van Bijker)

Figuur 6.5 geeft vier transport-kusthoek krommen weer:

- De in dit onderzoek berekende transport-kusthoek kromme voor het dwarsprofiel van raai 22 gecombineerd met golfklimaat 1,
- Het dwarsprofiel van raai 22, geschematiseerd als een rechte lijn met een helling van 1:100, gecombineerd met golfklimaat 1,
- De twee krommen berekend met de transportformule van Bijker in het Kustgenese rapport.

Het omslagpunt van positief naar negatief transport ofwel de evenwichtshoek waarbij het langstransport nul is, is in het Kustgenese rapport (Zitman 1987) ongeveer $-4,5$ graden t.o.v. de zeekering. Dit geldt overigens voor alle zes de combinaties van bodemhelling en transportformules. De met golfklimaat 1 berekende evenwichtshoek is ongeveer $16,6$ graden t.o.v. de zeekering. De helling van de vier transport-kusthoek krommen voor kleine kusthoeken is ongeveer gelijk.

6.4 Berekening kustontwikkeling met behulp van Unibest-CL

De kustlijn zoals die werd geschematiseerd in hoofdstuk 2 werd ingevoerd in Unibest-CL (profielhoogte 16,5 m). Door Unibest-CL de kustlijnverandering te laten berekenen in een tijdstap van een jaar werden de sedimenttransporten volgens de transportkusthoek kromme van golfklimaat 1 bekend. In figuur 6.6 is de huidige kustlijn en de gewijzigde kustlijn na één en tien jaar te zien.

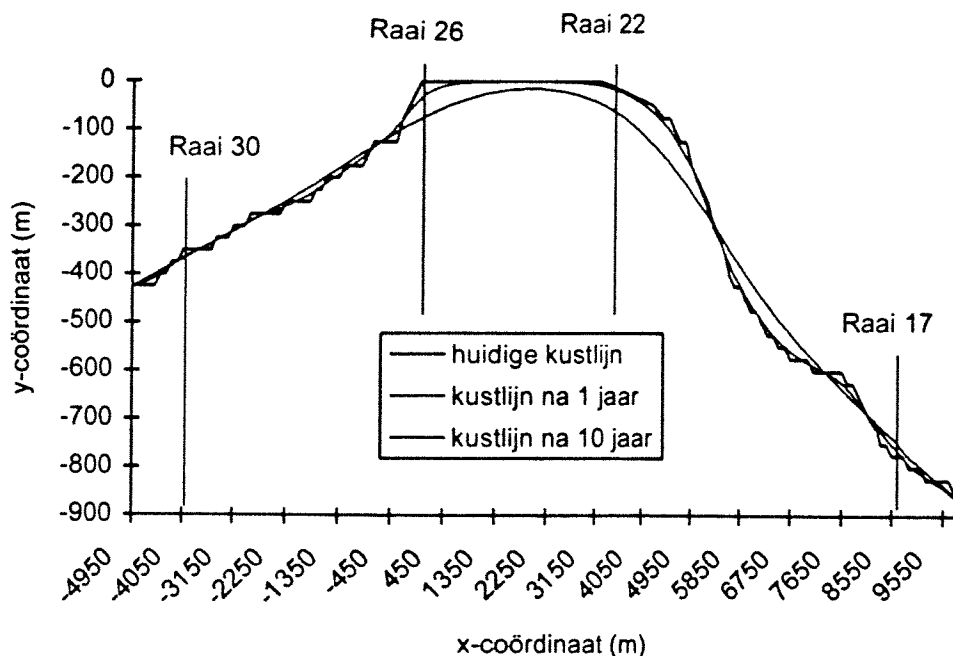


fig.6.6: Huidige kustlijn en de kustlijn na één jaar en na tien jaar berekend m.b.v. Unibest-CL (in deze figuur is een verschillende x- en y-schaal toegepast; de zeewering is niet weergegeven in de figuur)

Het valt op dat de kustlijn landinwaarts is verplaatst. Volgens Unibest-CL is links ca. 425.000 m³ sediment het model binnengekomen en heeft rechts ca. 572.000 m³ sediment het model verlaten. Een verlies van ca. 147.000 m³. Deze waarden zeggen echter weinig want aan de randen zijn de resultaten van de berekeningen met het model afhankelijk van de schematisatie. De aan de randen berekende transporten hangen af van de kusthoeken ter plaatse. In figuur 6.7 is te zien hoe na 1 jaar het sedimenttransport langs het kustvak verloopt bij aangenomen kustwijziging. In de figuur is te zien dat het gemiddelde transport langs het kustvak toeneemt. Vooral daar waar de zeewering begint (x=0) tot aan het einde van de zeewering (x=5000) neemt het langstransport sterk toe. Dit betekent dat de geschematiseerde kustlijn langzaam een verplaatsing landinwaarts zal ondergaan. Na 10 jaar ontstaat dan een kustlijn zoals te zien is in figuur 6.6. De zeewering ligt echter al tientallen jaren op dezelfde plaats. Van een achteruitgang van de kustlijn is in werkelijkheid geen sprake.

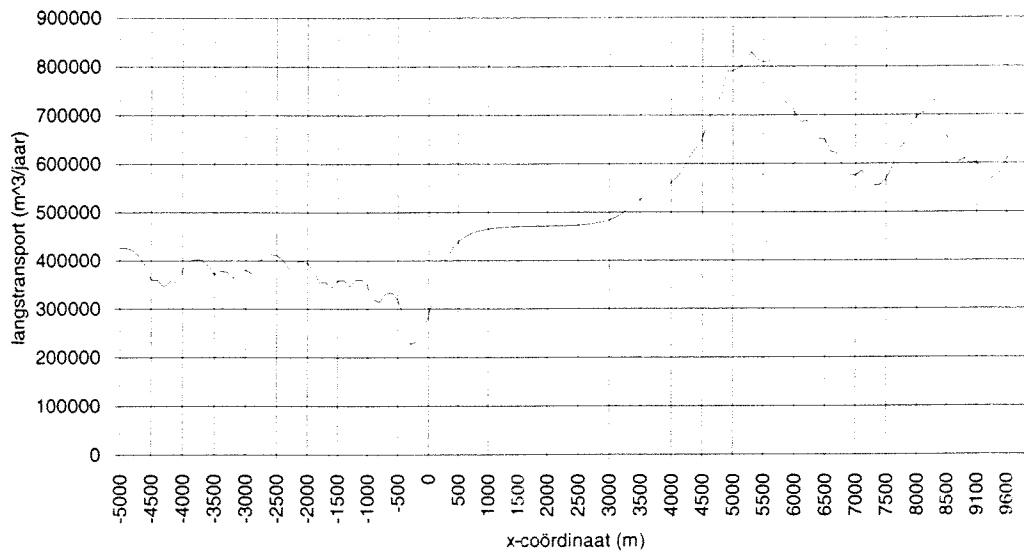


fig.6.7: Verloop van het sedimenttransport langs het kustvak na 1 jaar bij aangenomen kustwijziging

6.5 Verificatie van het berekende langstransport

Met de gepresenteerde schematisatie van de huidige kustlijn is volgens het model de zeewering binnen tien jaar geheel door de zee opgeslokt. De zeewering ligt, zoals beschreven bij de beschrijving van het studiegebied, al vele jaren op dezelfde plaats. Het model beschrijft de werkelijkheid dus niet.

Unibest-CL rekent met het sedimenttransport dat bij een kusthoek hoort. De schematisatie van de huidige kustlijn bevat een groot aantal verschillende kusthoeken. Unibest-CL berekent dan ook een groot aantal verschillende transporten. De gemiddelde trend is een toename van het langstransport langs het kustvak en dus een achteruitgang van de kustlijn. Dit is geen juiste benadering van de werkelijkheid. Het langstransport is in werkelijkheid langs het gehele kustvak praktisch constant. Dit moet wel want anders zou de kustlijn zich zeewaarts of landwaarts verplaatsen.

Het model is dan ook niet compleet. In werkelijkheid zijn vele strandhoofden langs het kustvak, en met name langs de zeewering, aanwezig. Het doel van een strandhoofdenrij is het langstransport te verminderen. Door een afname van het langstransport zal de erosie afnemen of zelfs aanzanding plaatsvinden. Aan de noordzijde van de strandhoofdenrij zal het langstransport echter weer toenemen zodat dan daar de erosie optreedt. Een verplaatsing van het erosieprobleem derhalve.

In het model is het mogelijk strandhoofden te modelleren. Maar deze toepassing is nu niet aan de orde omdat het model niet voldoet vanwege de problemen zoals beschreven aan het begin van deze paragraaf.

Een ander aspect dat niet in het model is verwerkt zijn de jaarlijks uitgevoerde zandsuppleties langs de Hollandse kust. Aan de noordzijde van de zeewering, o.a. bij Callantsoog, zijn regelmatig zandsuppleties uitgevoerd. Hier eist de kust blijikbaar zijn tol voor de strandhoofdenrij die de zeewering moet beschermen.

Het model rekent met één dwarsprofiel. Iedere raai heeft in werkelijkheid zijn eigen dwarsprofiel. Ter plaatse van de zeewering bestaat het dwarsprofiel niet eens geheel

uit zand. De helling van de zeewering is aan de zeezijde zodanig dat reflectie van golven niet of slechts in beperkte mate optreedt. Extra opwoeling en transport van sediment ten gevolge van gereflecteerde golven is dus vermoedelijk niet aan de orde.

7. Superpositie van twee kustlijnen

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de huidige kustlijn geschematiseerd als een rechte lijn. Door deze schematisatie is het mogelijk de verdeling van het sediment dat wordt ingebracht door de bron te berekenen. In paragraaf 7.2 zijn de resultaten te zien. In paragraaf 7.3 wordt de berekende kustlijn uit paragraaf 7.2 gesuperponeerd op de schematisatie van de huidige kustlijn.

7.2 Schematisatie van de kust als rechte lijn

Als in Unibest-CL een rechte kustlijn wordt gemodelleerd is de beperking van de schematisatie van de kust niet aanwezig. Over de volledige lengte van het kustvak is een constant sedimenttransport aanwezig. Het sedimenttransport dat hoort bij een kusthoek van nul graden. De kustlijn verplaatst niet in landinwaartse richting maar blijft liggen op dezelfde plaats. Deze schematisatie voldoet aan de werkelijke situatie. Volgens golfklimaat 1 is het sedimenttransport, bij een kusthoek van nul graden, ongeveer $425.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$. Met Unibest-CL kan nu door de bron $250.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ worden toegevoegd aan het kuststelsel. Deze bron wordt op $x=2550 \text{ m}$ gemodelleerd. Bij de berekening is een profielhoogte van $16,5 \text{ m}$ aangehouden. In figuur 7.1 is het verloop van de kustlijn te zien als functie van de tijd. Na tien jaar is over de gehele lengte van de zeevering al een zeewaartse kustlijnverplaatsing te zien.

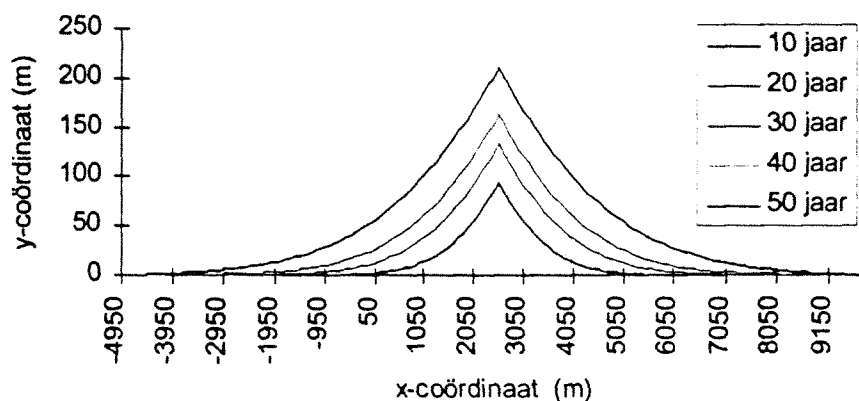


fig.7.1: Verloop van de kustlijn als functie van de tijd bij een profielhoogte van $16,5 \text{ m}$ (in deze figuur is een verschillende x- en y-schaal toegepast)

7.3 Superpositie rechte kustlijn en huidige kustlijn

De berekende nieuwe kustlijn kan worden gesuperponeerd op de geschematiseerde huidige kustlijn. Zie figuur 7.2. Er is dan te zien dat de gehele zeewering na 50 jaar is bedolven onder het sediment. Na tien jaar is al een groot stuk strand beschikbaar voor recreatie. In figuur 7.3 wordt het strand bij de zeewering op een grotere schaal weergegeven.

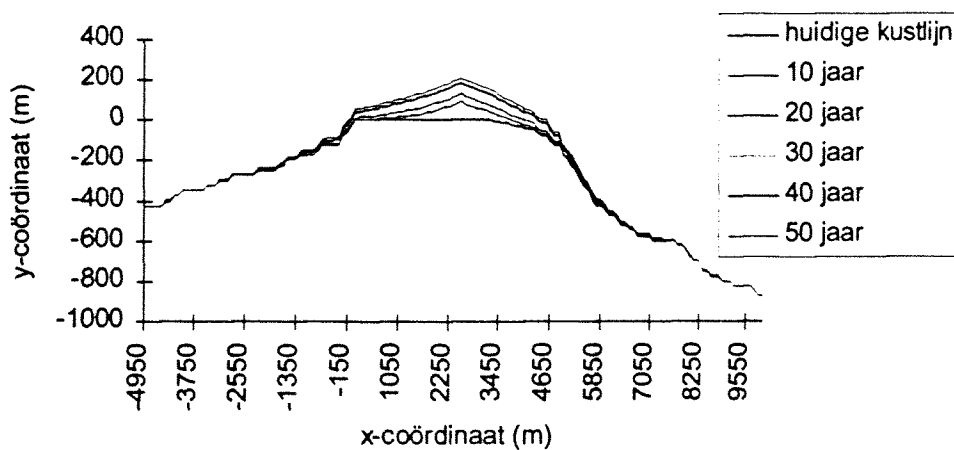


fig.7.2: Superpositie van de kustlijnen (in deze figuur is een verschillende x- en y-schaal toegepast)

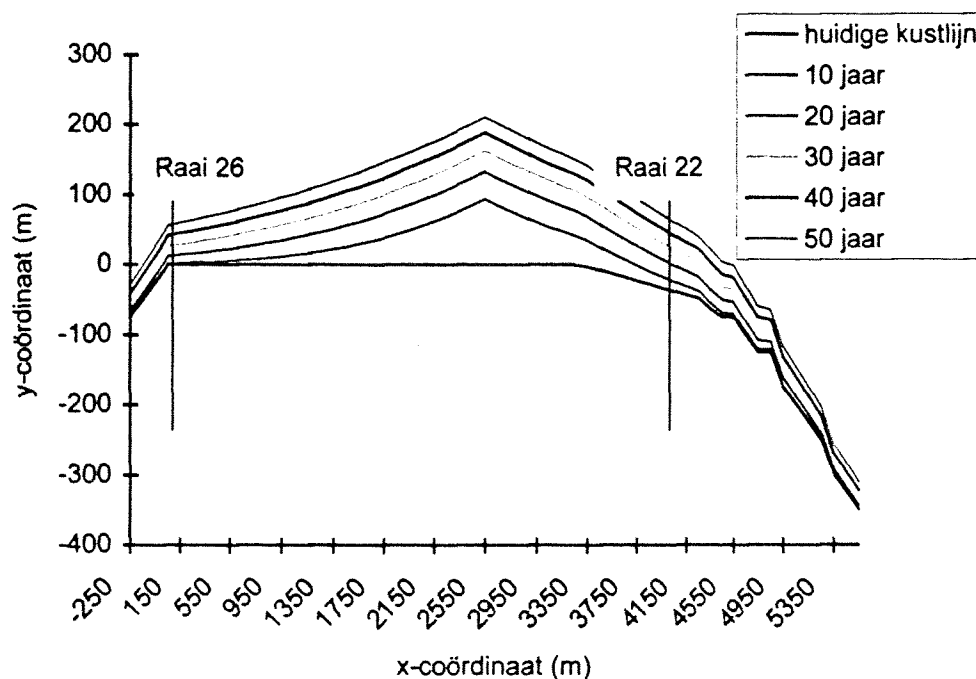


fig.7.3: Strand voor de zeewering (in deze figuur is een verschillende x- en y-schaal toegepast)

8. Gevoeligheidsanalyse

8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt in paragraaf 8.2 de ontwikkeling van de kustlijn in de tijd beschreven. In paragraaf 8.3 wordt de invloed van de variatie van de profielhoogte beschreven. In paragraaf 8.4 wordt de suppletiehoeveelheid met 50.000 m³/jaar vermeerderd en verminderd ten opzichte van de geplande hoeveelheid van 250.000 m³/jaar en wordt de invloed hiervan op de kustlijn beschreven. In paragraaf 8.5 wordt beschreven wat er gebeurt met de kustontwikkeling als na verloop van tijd met de jaarlijkse voeding wordt gestaakt. Tevens wordt in deze paragraaf beschreven wat het effect op de kustlijn is indien de kustmatige rivier op een andere locatie, dan het midden van de zeewering, langs de kust wordt aangelegd. In paragraaf 8.6 tenslotte worden enkele methoden beschreven met betrekking tot het toevoegen van het sediment aan het kuststelsel.

8.2 Ontwikkeling van de kustlijn in de tijd

De maximale zeewaartse kustlijnverplaatsing treedt op ter plaatse van de bron (figuur 7.1). Deze maximale verplaatsing kan berekend worden met de in paragraaf 5.5.2 beschreven vergelijking (5.13). Met behulp van Unibest-CL is het mogelijk de kustlijnontwikkeling van het gehele, door het toegevoegde sediment beïnvloede, gebied te berekenen. Hoe de zeewaartse kustlijnverplaatsing ter plaatse van de bron zich ontwikkelt in de tijd is weergegeven in figuur 8.1. De in figuur 8.1 weergegeven kromme is berekend met behulp van Unibest-CL. De kustlijnitbouw ter plaatse van de bron is evenredig met \sqrt{t} .

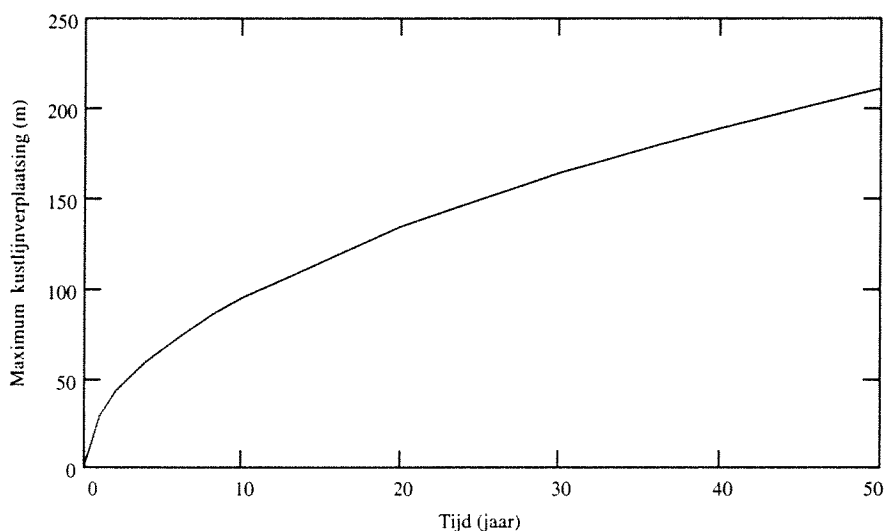


fig.8.1: Verloop van de maximale zeewaartse kustlijnverplaatsing (t.p.v. de bron) als functie van de tijd; profielhoogte 16,5 m

De kromme voldoet aan vergelijking (8.1).

$$O_{y_{\max}} = C \cdot \sqrt{t} \quad (8.1)$$

Waarin: $O_{y_{\max}}$: maximum kustlijnverplaatsing (m)
 C : constante (m/jaar^{1/2})
 t : tijd (jaar)

De constante C is ongeveer 30 m/jaar^{1/2}. Voor vergelijking (5.13) betekent dit (8.2):

$$C = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot q_b \cdot \frac{1}{\sqrt{s_x \cdot h}} \quad (8.2)$$

Met een bron q_b van 250.000 m³/jaar en een profielhoogte h van 16,5 m volgt dat $s_x \approx 1.350.000$ m³/rad*jaar.

In de berekening wordt geen rekening gehouden met een toename van het langstransport ten gevolge van stroomcontractie door de kustuitbouw. Door de stroomcontractie zal de maximum kustuitbouw waarschijnlijk minder groot zijn. De getijstroom zal aan de loefzijde van de kustuitbouw toenemen en aan de lijzijde afnemen. Aan de loefzijde zal dus erosie optreden en aan de lijzijde aanzanding. Doordat de langsstroomsnelheid tijdens vloed groter is dan tijdens eb zal een netto transport in noordelijke richting plaatsvinden. De "scherpe punt" in de kustlijn zoals te zien in figuur 7.1 zal in werkelijkheid niet aanwezig zijn. In werkelijkheid zal deze "punt" door de langsstroom worden afgeknut.

8.3 Variatie van de profielhoogte

De profielhoogte is de hoogte van het profiel waarover aanzanding en erosie plaatsvindt. Bij gelijkblijvend langstransport zal bij een verandering van de profielhoogte de horizontale kustlijnverplaatsing ook veranderen. Dit blijkt direct uit de continuïteitsvergelijking (8.3).

$$\frac{\partial S_x}{\partial x} + h \cdot \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (5.6) \quad (8.3)$$

Bij een gelijke gradiënt in het langstransport $\partial S_x / \partial x$ veroorzaakt een toename van de profielhoogte h een afname van de horizontale kustlijnverplaatsing y . Het omgekeerde is het geval bij een afname van de profielhoogte. In figuur 8.2 is voor een suppletiehoeveelheid van 250.000 m³/jaar de kustlijnontwikkeling weergegeven voor drie verschillende profielhoogten na 10 en na 50 jaar. De maximum kustlijnverplaatsing ter plaatse van de bron als functie van de profielhoogte is weergegeven in figuur 8.3.

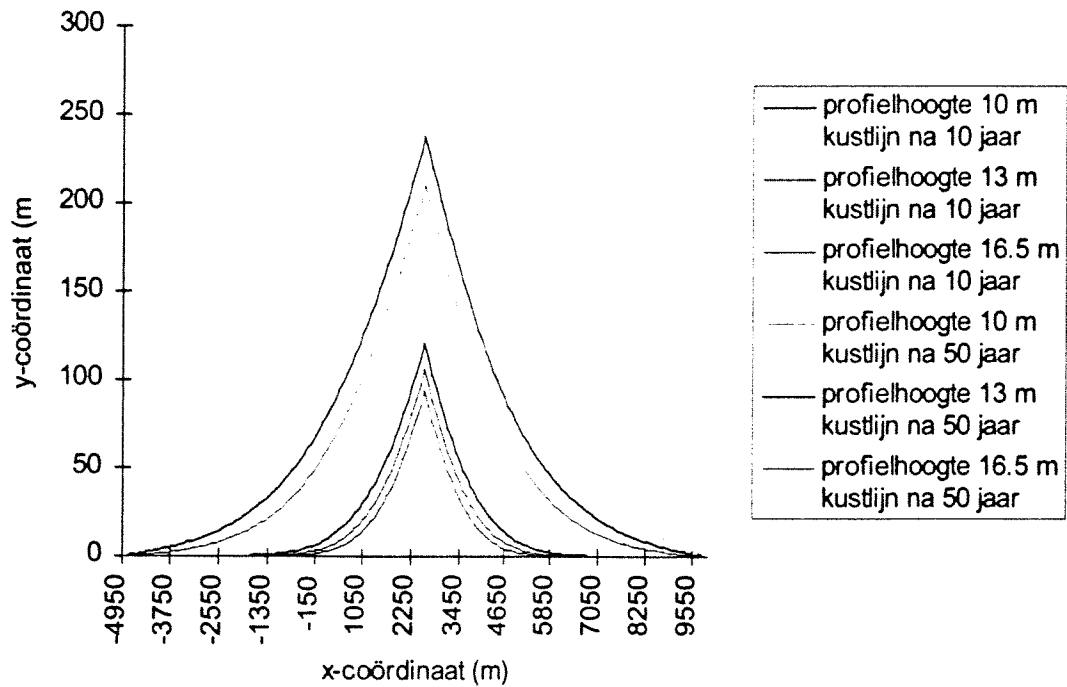


fig.8.2: Kustlijnontwikkeling bij profielhoogten van 10, 13 en 16,5 m na 10 en 50 jaar; suppletiehoeveelheid 250.000 m³/jaar

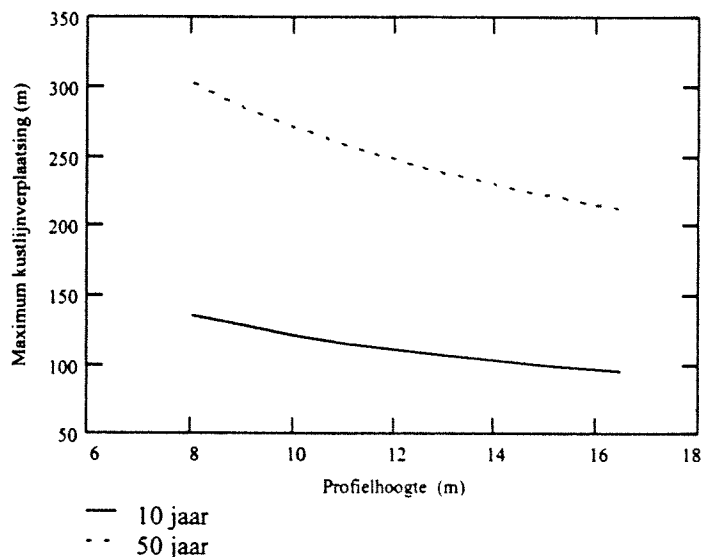


fig.8.3: De maximum kustlijnverplaatsing ter plaatse van de bron als functie van de profielhoogte na 10 en na 50 jaar; suppletiehoeveelheid 250.000 m³/jaar

De hoogte van het profiel waarover het sediment zich verdeeld is van invloed op de kustlijnontwikkeling. In bovenstaande figuren is te zien dat de aanname van een profielhoogte van 10 m een grotere kustuitbouw tot gevolg heeft dan de aanname van een profielhoogte van 16 m. Na 10 jaar varieert de maximale kustlijnverplaatsing van ca. 135 m voor een profielhoogte van 8 m tot een maximale kustlijnverplaatsing van

kustlijnverplaatsing van ca. 300 m voor een profielhoogte van 8 m tot een maximale kustlijnverplaatsing van ca. 215 m voor een profielhoogte van 16 m.

Uit de berekeningen blijkt dat de veronderstelde profielhoogte van grote invloed is op de kustlijnontwikkeling. Het langstransport vindt voornamelijk plaats in de brandingszone. Dit is de zone van de brekerlijn tot aan het punt waar het kustprofiel de hoogte gelijk aan NAP snijdt. Deze hoogte wordt nog vermeerderd met de hoogte ten gevolge van de golfploop en de verhoging van de waterstand ten gevolge van de golfspanningscomponent loodrecht op de kust, de "wave set-up". Verondersteld wordt een verhoging van ongeveer 1,5 meter. De brandingszone begint in dit geval op NAP-11,5 m en eindigt op NAP+1,5 m. De aanzanding en de erosie die in dit gebied plaatsvindt wordt door dwarstransport over de aan te nemen dwarsprofielhoogte verdeeld. Het sediment zal niet alleen naar dieper water maar ook landinwaarts worden getransporteerd.

Omdat voor de zeewering een "nieuw" strand zal ontstaan moet rekening gehouden worden met duinvorming. Aanlandige wind zal sediment van het strand richting de zeewering transporteren. De zeewering zal daardoor gedeeltelijk onder het zand worden bedolven. De totale profielhoogte waarover het dwarstransport zou kunnen plaatsvinden is van ongeveer NAP-11,5 m tot NAP+11,5 m (Deltahoogte), dit is 23 m. Het duinprofiel zal zich echter niet volledig met de ontwikkeling van de kustlijn zeewaarts verplaatsen. In dit onderzoek is een profielhoogte aangenomen van 16,5 meter. Verondersteld wordt dat het volume aan sediment ter grootte van een "halve duin" zich met de ontwikkeling van de kustlijn zeewaarts zal verplaatsen. Dit is een conservatieve aanname. In de berekening wordt dan uitgegaan van een strandhoogte van ongeveer NAP+5 m. De hoogte van een "normaal" strand langs de kust is ongeveer NAP+1,5 m.

8.4 Variatie van de suppletiehoeveelheid

Een variatie van de suppletiehoeveelheid heeft invloed op de ontwikkeling van de kustlijn in de tijd. Naast de geplande suppletie van 250.000 m³/jaar is het mogelijk bijvoorbeeld 50.000 m³/jaar sediment meer of minder aan het kuststelsel toe te voegen. De uitbouw in de langsrichting van de kust wordt door een variatie van de suppletiehoeveelheid minder beïnvloed dan de uitbouw loodrecht op de kust. In figuur 8.4 is de ontwikkeling van de kustlijn gegeven indien slechts 200.000 m³/jaar sediment aan het kuststelsel zou worden toegevoegd. Indien de geplande suppletiehoeveelheid van 250.000 m³/jaar zou worden vergroot tot 300.000 m³/jaar ontstaat een kustlijn zoals afgebeeld in figuur 8.5. In deze figuren is te zien dat ondanks een verschil van 100.000 m³/jaar de uitbouw in de langsrichting van de kust ongeveer gelijk is. Na 25 jaar is in beide gevallen een kustvak van ongeveer -2450 m tot 7550 m, ongeveer 10 km, beïnvloed. De maximale kustlijnverplaatsing ter plaatse van de bron (x=2550) is 120 m resp. 175 m. De uitbouw loodrecht op de kust wordt in grotere mate beïnvloed.

Omdat de kusthoeken tijdens de berekening klein blijven ($-10^\circ < \text{kusthoek} < 10^\circ$) zijn de veranderingen in langstransport bijna lineair evenredig met veranderingen in de kusthoek (figuur 6.1). De door Unibest berekende kustuitbouw is bijna symmetrisch ten opzichte van de lijn $y=2550$ m. De transport-kusthoek kromme (figuur 6.1) is puntsymmetrisch ten opzichte van het punt: (kusthoek=16,6 graden, langstransport= 0 m³/jaar). Hier heeft de transport-kusthoek kromme een buigpunt. Zou de kusthoek van de zeewering 16,6 graden zijn, in plaats van nul graden, dan zou de door de bron veroorzaakte kustuitbouw theoretisch volledig symmetrisch zijn.

m^3/jaar). Hier heeft de transport-kusthoek kromme een buigpunt. Zou de kusthoek van de zeewering 16,6 graden zijn, in plaats van nul graden, dan zou de door de bron veroorzaakte kustuitbouw theoretisch volledig symmetrisch zijn.

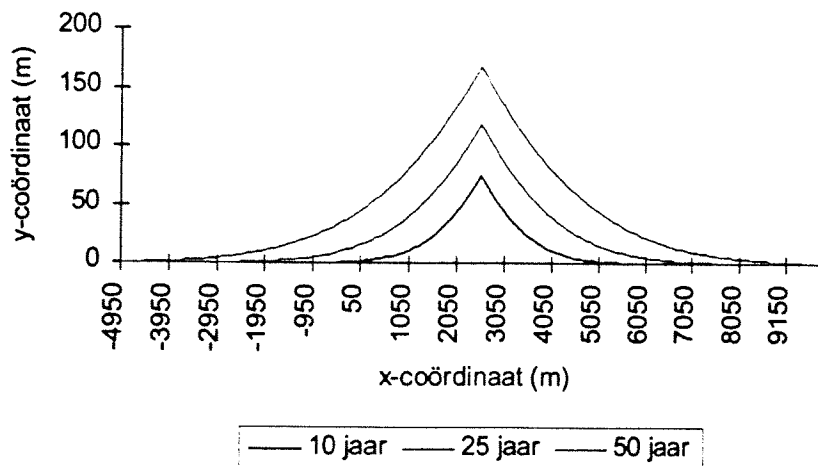


fig.8.4: Ontwikkeling van de kustlijn bij een suppletiehoeveelheid van $200.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$

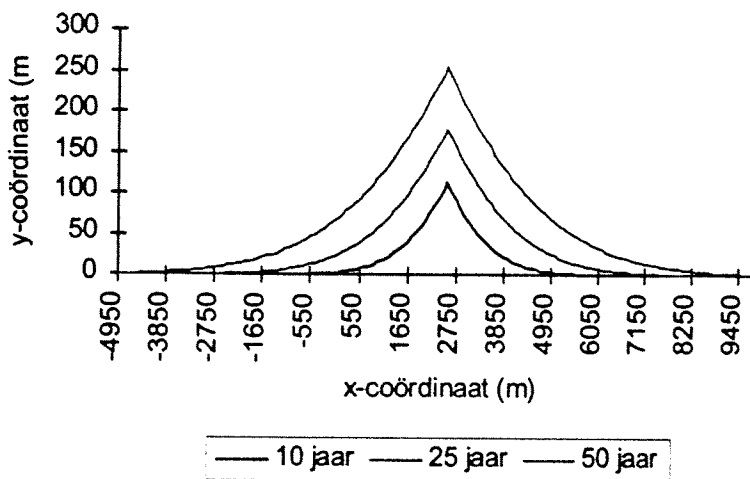


fig.8.5: Ontwikkeling van de kustlijn bij een suppletiehoeveelheid van $300.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$

In figuur 8.6 wordt de maximale kustlijnverplaatsing ter plaatse van de bron weergegeven als functie van de suppletiehoeveelheid bij een suppletieduur van 10 jaar. Bij een suppletiehoeveelheid van $100.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ is de maximale kustlijnverplaatsing ongeveer 35 m. Bij een suppletiehoeveelheid van $400.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ is de maximale kustlijnverplaatsing ongeveer 150 m. Het verband tussen suppletiehoeveelheid en maximale kustlijnverplaatsing is lineair.

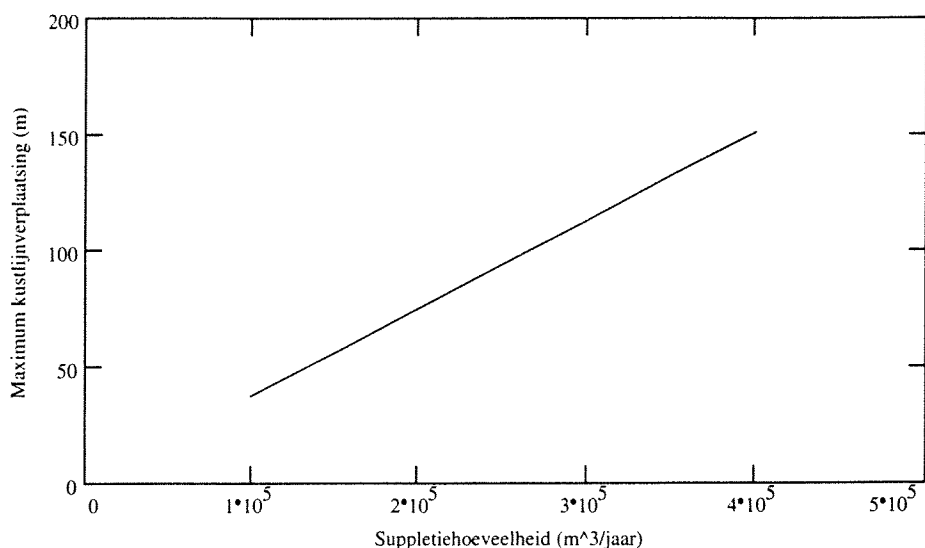


fig.8.6: Maximale kustlijnverplaatsing ter plaatse van de bron ($x=2550$) als functie van de suppletiehoeveelheid bij een suppletieduur van 10 jaar

Met behulp van de transport-kusthoek kromme kan worden bepaald wat ongeveer de maximum, door de bron toe te voegen, hoeveelheid sediment is die door het kuststelsel kan worden verdeeld. In figuur 6.1 is de berekende transport-kusthoek kromme te zien. De zeevering heeft een kusthoek van nul graden. Bij deze kusthoek is volgens de transport-kusthoek kromme een jaarlijks gemiddeld langstransport aanwezig van ongeveer 425.000 m³/jaar. Bij een toevoeging van sediment aan het kuststelsel zal ter plaatse van de toevoeging kustuitbouw plaatsvinden en zal de kusthoek veranderen. De noordelijke zijde van de kustuitbouw veroorzaakt negatieve kusthoeken. De zuidelijke zijde van de kustuitbouw veroorzaakt positieve kusthoeken. In figuur 6.3 is te zien dat de grootste sedimenthoeveelheden kunnen worden afgevoerd bij kusthoeken van ongeveer -42,8 resp. 76 graden. Bij gelijke ontwikkeling van de beide zijden van de kustuitbouw zal de minimum kusthoek van ongeveer -42,8 graden het eerst worden bereikt. Bij een verdere toename van de kustuitbouw zal de negatieve kusthoek steeds kleiner worden. Wordt de kusthoek kleiner dan -42,8 graden dan neemt de langstransportcapaciteit af. Het door de bron toegevoegde sediment kan dan niet meer op een fatsoenlijke manier verdeeld worden. De maximum hoeveelheid, door het kuststelsel, te verdelen sediment bedraagt dus ongeveer 960.000 m³/jaar. Reeds aanwezig is een langstransport van 425.000 m³/jaar. Wat over blijft is dus 960.000-425.000= 535.000 m³/jaar. Het sediment dat door de bron wordt toegevoegd verdeelt zich echter in noordelijke en zuidelijke richting zodat de maximum door de bron toegevoegde hoeveelheid sediment ongeveer 2*535.000=1.070.000 m³/jaar bedraagt.

8.5 Effect beëindigen van de suppletie

Het is vermoedelijk niet zinvol de suppletie eeuwen lang voort te zetten. Wanneer op een gegeven moment de sedimenttoevoeging wordt gestaakt zal het reeds toegevoegde sediment zich langs de kust blijven verdelen. De maximale kustlijnverplaatsing zal dan afnemen en de verdeling van het sediment in de langsrichting van de kust zal toenemen. In figuur 8.7 is te zien hoe de ontwikkeling van de kustlijn is indien na tien jaar de toevoeging van sediment aan het kuststelsel wordt gestaakt.

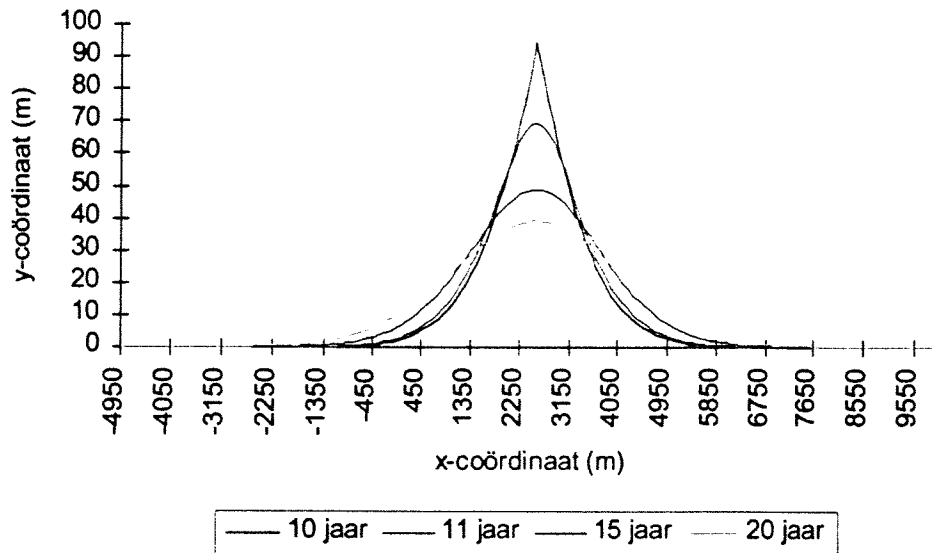


fig.8.7: De kustlijn na een suppletieduur van 10 jaar en de kustlijn na 1, 5 en 10 jaar na beëindiging van de suppletie

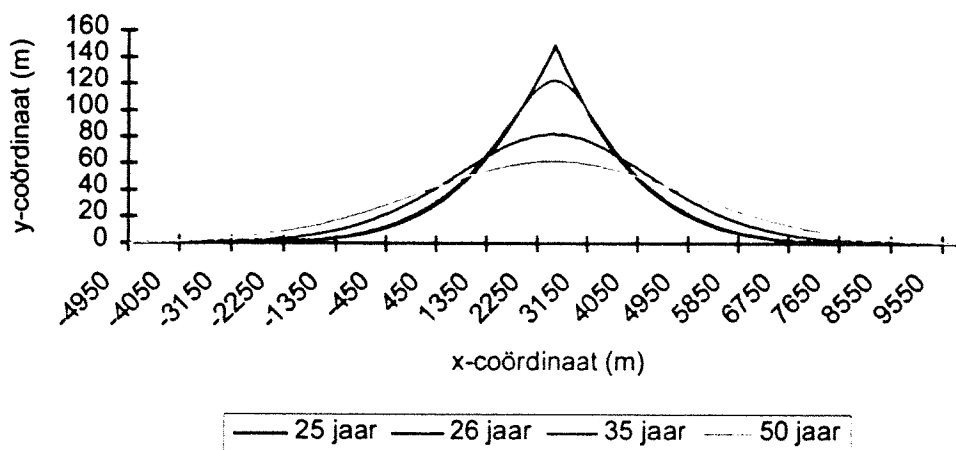


fig.8.8: De kustlijn na een suppletieduur van 25 jaar en de kustlijn na 1, 10 en 25 jaar na beëindiging van de suppletie

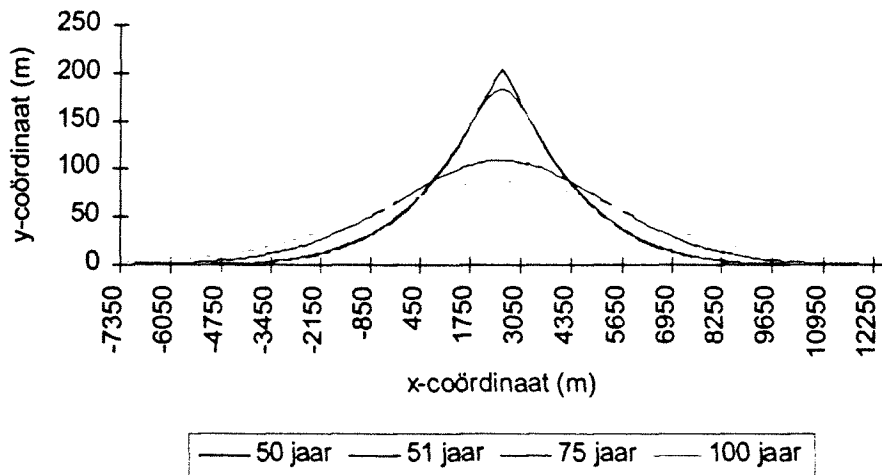


fig.8.9: De kustlijn na een suppletieduur van 50 jaar en de kustlijn na 1, 25 en 50 jaar na beëindiging van de suppletie

Een jaar na de beëindiging van de suppletie, 11 jaar na aanvang van de suppletie, is al te zien dat het sediment zich verder langs de kust verdeelt. De maximale kustlijnverplaatsing in zeevaartse richting neemt af en de verdeling van het sediment in de langsrichting van de kust neemt toe.

De ontwikkeling van de kustlijn na de beëindiging van suppleties met een duur van 25 en 50 jaar, is te zien in de figuren 8.8 en 8.9. Na een suppletie met een duur van 50 jaar is zoveel sediment in het kuststelsel gebracht (12,5 miljoen m³) dat, na ongeveer 25 jaar na beëindiging, tot op 10 kilometer afstand van het suppletiepunt een zeevaartse verplaatsing van de kustlijn is waar te nemen. De afname van de maximale kustlijnverplaatsing als functie van de tijd is te zien in figuur 8.10. In de eerste jaren na het beëindigen van de sedimenttoevoeging is de afname van de maximale kustlijnverplaatsing het grootst.

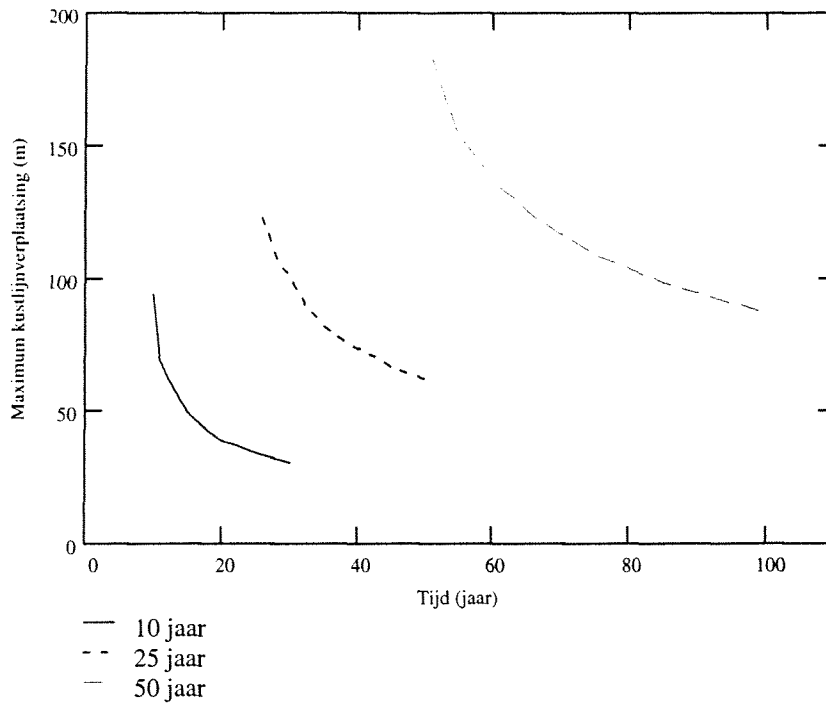


fig.8.10: Afname van de maximale kustlijnverplaatsing als functie van de tijd, na een suppletieduur van 10, 25 en 50 jaar (resp.fig.8.7 t/m fig.8.9)

Het valt op dat na enige tijd, na het beëindigen van de sedimenttoevoeging, de kustlijn ongeveer het model heeft van een Gausskromme (figuren 8.7 t/m 8.9). In paragraaf 5.5.2 is voor een kustlijnform met het model van een Gausskromme een analytische oplossing gegeven (8.4).

$$y = \frac{V}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot \frac{s_x}{365} \cdot h \cdot (t+T)}} \exp\left[-\frac{x^2 \cdot h}{4 \cdot \frac{s_x}{365} \cdot (t+T)}\right] \quad (5.14) \quad (8.4)$$

Waarin:	y	:y-coördinaat	(m)
	x	:x-coördinaat	(m)
	V	:volume zandtoevoeging	(m ³)
	s _x	:evenredigheidsconstante	(m ³ /rad*jaar)
	h	:profielhoogte	(m)
	T	:tijdconstante	(dagen)
	t	:tijd	(dagen)

Deze vergelijking beschrijft de verdeling van het sediment langs een kustlijn als die kustlijn het model heeft van Gausskromme. Het blijkt dat de y-schaal van de Gaussvormige kustlijn afneemt evenredig met 1/√t. Dit betekent, wegens behoud van sedimentvolume, dat de x-schaal moet toenemen evenredig met √t.

In figuur 8.11 is voor een Gauss-vormige kustlijn, die ontstaan is na gedurende een periode van 10 jaar 250.000 m³ sediment te hebben toegevoegd, de afname van de maximale kustlijnverplaatsing in de tijd weergegeven. Voor de periode van 20 tot 50

jaar na beëindigen van de sedimenttoevoeging blijkt de afname van de maximale kustlijnverplaatsing te voldoen aan vergelijking (8.5). Zowel de benadering volgens vergelijking (8.5) als de met vergelijking (8.4) berekende afname van de maximale kustlijnverplaatsing is in figuur 8.11 weergegeven.

$$y(t) = \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot 94 + 7 \quad (8.5)$$

Waarin: $y(t)$: Maximum kustlijnverplaatsing (m)
 t : tijd (jaar)

In de eerste 20 jaar na het beëindigen van de sedimenttoevoeging is de afname van de maximale kustlijnverplaatsing ongeveer 15 meter. Tussen 20 en 50 jaar na het beëindigen van de sedimenttoevoeging is de afname van de maximale kustlijnverplaatsing nog slechts ongeveer 10 meter. Doordat de kusthoeken dichterbij de evenwichtshoek komen te liggen nemen de langstransporten af. Hierdoor wordt het sediment in de loop van de tijd minder snel langs de kust verdeeld.

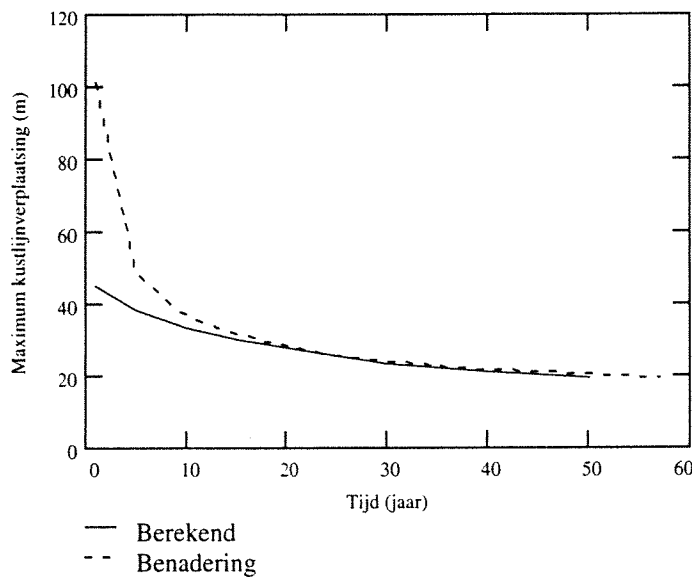


fig.8.11: Afname van de maximale kustlijnverplaatsing volgens berekening met vgl.(8.4) en volgens benadering met vgl.(8.5) ($V=2.500.000 \text{ m}^3$, $s_x=1.350.000 \text{ m}^3/\text{rad} \cdot \text{jaar}$, $h=16,5 \text{ m}$, $T=10 \text{ jaar}$)

In figuur 8.12 wordt op een kleine schaal weergegeven wat het effect is van een verandering van de locatie van de kunstmatige rivier. In dit onderzoek is het midden van de zeewering gekozen. Deze locatie zorgt er voor dat de zeewering zo spoedig mogelijk onder het zand bedolven raakt. Het is natuurlijk ook heel goed mogelijk het plan van sediment toevoeging elders langs de kust uit te voeren. Figuur 8.12 laat voor enkele locaties de kustuitbouw zien.

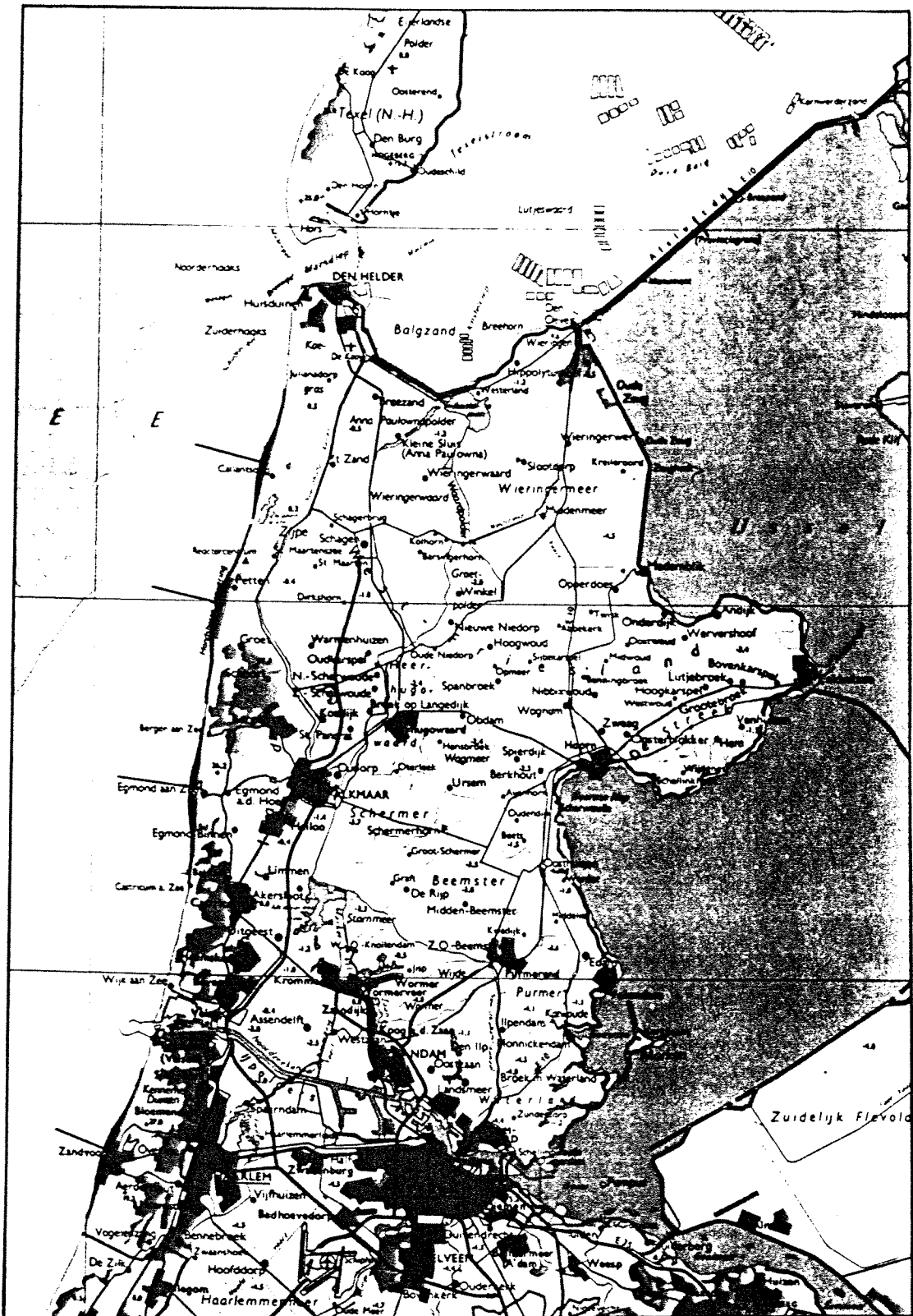


fig.8.12: Kustuitbouw bij variatie van de locatie van de kunstmatige rivier langs de Hollandse kust (suppletiehoeveelheid 250.000 m³/jaar, suppletieduur 50 jaar, profielhoogte 16,5 m)

8.6 Methode van sedimenttoevoeging

Het doel van het toevoegen van sediment aan het kuststelsel is het creëren van een nieuw recreatiegebied. Een breed strand voor de Hondsbossche en Pettemer zeezuivering lijkt zeer aantrekkelijk voor strandliefhebbers. Tevens zal het strand de golfaanval op de zeezuivering verminderen. Voor de veiligheid van het achterland is de zeezuivering op zichzelf echter voldoende.

Het toevoegen van sediment aan het kuststelsel kan wat betreft de richting loodrecht op de kust op twee plaatsen:

1. Aan de voorzijde van de zeezuivering. Waar het sediment slechts incidenteel bij storm onder invloed van golfaanval zal verkeren,
2. Op het strand en/of op de vooroever. Hier zal het sediment voortdurend worden blootgesteld aan dagelijkse getij- en golfinvloeden.

Gezien het doel van de sedimenttoevoeging, een breed strand, komt alleen locatie 2 in aanmerking. Door de getij- en golfinvloeden kan het toegevoegde sediment vrijwel continu langs de kust worden verdeeld.

In de richting evenwijdig aan de kust kan het sediment het beste vanuit het midden van de zeezuivering worden toegevoegd. De zeezuivering wordt dan gelijkmatig over de gehele lengte bedolven onder het sediment.

Door de locatie waar het sediment kan worden toegevoegd, op het strand en/of op de vooroever kan eenvoudig een keuze worden gemaakt over de manier waarop het sediment aan het kuststelsel kan worden toegevoegd.

De in het plan voorgestelde sedimenthoeveelheid van 250.000 m³ per jaar is voor het huidige baggermateriaal niet zo groot. Door een sleephopperzuiger met een beuninhoud van 8.000 m³ is binnen twee weken de geplande hoeveelheid aangebracht. De kosten van dergelijk materiaal zijn echter aanzienlijk.

Een kleine hopperzuiger die via een leiding het sediment op het strand perst levert een hoog rendement. Weinig sediment zal verloren gaan naar dieper water. Een kleine hopperzuiger die via bodemschuiven het sediment op de vooroever dumpst is goedkoper maar levert een minder hoog rendement. Sediment zal verloren gaan naar dieper water. De kosten van een persleiding zijn bij deze laatste variant niet aan de orde. Een eenmaal aangelegde persleiding kan echter een aantal jaren achtereen worden gebruikt. De aanlegkosten kunnen dan over meerdere suppleties worden "afgeschreven". Deze optie verdient de voorkeur boven een tijdelijke persleiding die na het uitvoeren van de suppletie weer wordt weggehaald.

De jaarlijkse suppletie van 250.000 m³ kan waarschijnlijk het best worden uitgevoerd in samenhang met baggerwerkzaamheden die elders worden uitgevoerd. Door "werk met werk" te maken kunnen kosten worden bespaard. Bijvoorbeeld door gebruik te maken van het sediment dat vrijkomt bij het op diepte houden van de vaargeul van IJmuiden. Omdat de sedimenttoevoeging "slechts" wordt gedaan om een strand voor recreatiedoeleinden te creëren en niet om de ligging van de kustlijn te handhaven of de veiligheid van het achterland te waarborgen is het het beste om sediment toe te voegen wanneer het voorhanden is. Uit de berekeningen is bovendien gebleken dat het tijdstip en de grootte van de sedimenttoevoeging voor het doel van de sedimenttoevoeging, het creëren van een strand ten behoeve van recreatie, niet zo belangrijk is.

In figuur 8.13 is te zien dat het oppervlak van de kustuitbouw lineair evenredig is met de tijd. Bij een sedimenttoevoeging van 250.000 m³/jaar wordt per jaar ongeveer 1,5 hectare land gewonnen. Bij een kostprijs van fl.10,- per m³ sediment betekent dit ca. 2,5 miljoen gulden per jaar. Dit is ca. fl.165,-/m². Bij de berekeningen is uitgegaan van een profielhoogte van 16,5 m. Bij een kleiner veronderstelde profielhoogte zal het oppervlak van de kustuitbouw toenemen en zal de kostprijs per hectare kustaanwas kleiner zijn.

Het onderhoud aan de zeewering zal in de loop van de tijd kunnen worden gestaakt. Deze onderhoudskosten zijn echter niet zo groot dat ze de kostprijs van het project wezenlijk zullen verminderen. Tevens zal de kustaanwas in de loop van de tijd enige beheerskosten met zich mee brengen.

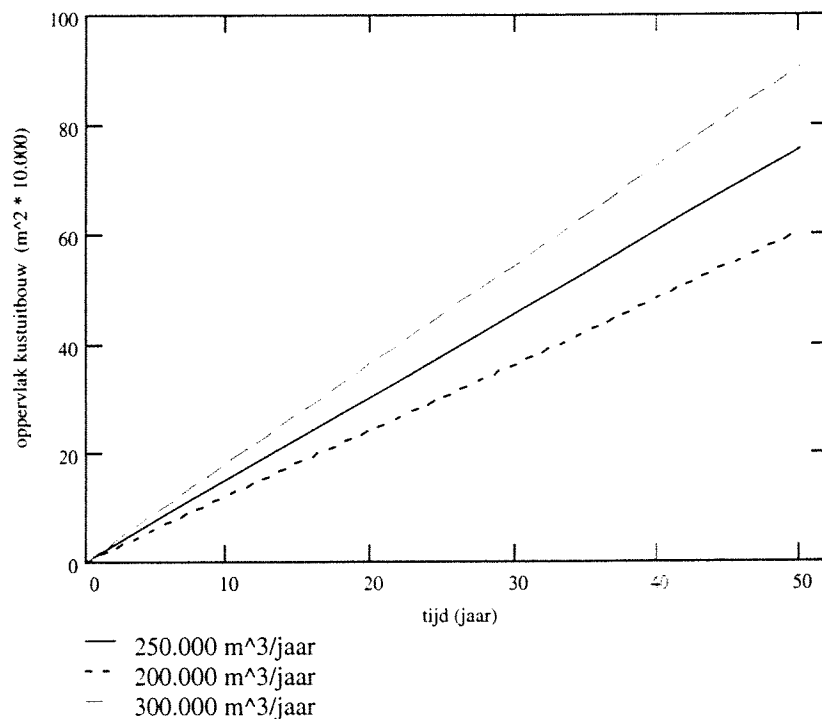


fig.8.13: Oppervlak van de kustuitbouw als functie van de tijd bij suppletiehoeveelheden van 200.000, 250.000 en 300.000 m³/jaar (profielhoogte 16,5 m)

9. Conclusies en aanbevelingen

Het modelleren van een kunstmatige rivier ter plaatse van de Hondsbossche en Pettemer zeewering is mogelijk met behulp van het programma Unibest. De huidige kustlijn moet echter geschematiseerd worden als een rechte lijn. De bij deze schematisatie berekende kustlijnverplaatsingen kunnen vervolgens worden gesuperponeerd op de huidige kustlijn. Het is niet goed mogelijk om de werkelijke situatie volledig te modelleren. De strandhoofdenrij langs de zeewering kan niet in de berekening worden betrokken. Ook de stroomcontractie ten gevolge van de kustuitbouw is niet in de berekening meegenomen.

Uit berekeningen met het huidige model blijkt dat:

- De kustuitbouw ter plaatse van de bron evenredig is met \sqrt{t} . De verdeling van het sediment langs de kustlijn is dan evenredig met $1/\sqrt{t}$,
- De jaarlijkse kustuitbouw ter plaatse van de bron is lineair afhankelijk van de jaarlijkse sedimenttoevoeging,
- Bij de beëindiging van de sedimenttoevoeging zal het reeds toegevoegde sediment zich verder langs de kust verdelen. De maximum kustuitbouw ter plaatse van de bron neemt dan af,
- Bij een suppletiehoeveelheid van 250.000 m³/jaar wordt jaarlijks ongeveer 1,5 hectare land gewonnen (veronderstelde profielhoogte 16,5 m).

Bij de gevoeligheidsanalyse is gebleken dat de variatie van de profielhoogte van grote invloed is op de ontwikkeling van de kustuitbouw. Na enige tijd zal duinvorming optreden. De hoogte van de te vormen duinen is een onbekende factor.

Het in deze studie beschreven strand heeft geen functie met betrekking tot handhaving van de kustlijn of verdediging van het achterland. Het lijkt daarom het beste om in dit kustvak alleen sediment toe te voegen indien in een naburig kustvak het benodigde materieel voor handen is. Daarnaast is het misschien mogelijk "werk met werk" te maken door het toevoegen van sediment te combineren met bijvoorbeeld een verdieping van de vaargeul van IJmuiden.

Literatuur

- Bakker, W.Th.J.N.P., *Dynamica van kusten*, Stichting Postdoctoraal Onderwijs in de Civiele Techniek, Cursus kustdynamica en kustverdediging, 1977/1978.
- Battjes, J.A., J.P.F.M. Janssen, *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*, Coastal Engineering, 1978.
- Battjes, J.A., college handleiding: *b76 korte golven*, Delft 1986.
- Delft Hydraulics, *Unibest Programme Manual*, Delft 1994.
- Delft Hydraulics, *User Manual Unibest-LT: Computations of sediment transport along a uniform coast*, Version 4.0, Delft 1993.
- Delft Hydraulics, *User Manual Unibest-CL: A Software suite for simulation of sediment transport processes and related morphodynamics of beach profiles and coastline evolution*, Version 3.11, Delft 1993.
- Pelnard-Considére, R., *Essai de Théorie de L'Evolution des Formes de Rivage en Plages de Sable et de Galets*, IV^{em} Journées de L'Hydraulique, Paris 1956.
- Rijkswaterstaat, *Handboek zandsuppleties*, 1988.
- Rijn, van L.C., A. Reniers, T.Zitman, J.S. Ribberink, 1995, *Yearly-averaged sand transport at the -20 m and -8m NAP depth contours of the Jarkus-profiles 14, 40, 76 and 103*, Delft Hydraulics, report H1887, Project Kustgenese.
- RIKZ, Jaarlijkse lodingen profiel 2200, 1986/1991
- Schilstra, J.J., *De Hondsbossche*, 1981.
- Stive, M.J.F., *Vorming en toetsing van hypothesen*, Kustgenese Fase 1, Hoofdrapport, 1987.
- Topografische dienst, Topografische kaart 19 West, Delft, 1971.
- Velden, E.T.J.M. van der, college handleiding: *f7 Coastal engineering volume II*, Delft 1994.
- Zitman, T.J., *Analyse van de rol van langtransport bij de ontwikkeling van de Hollandse kust*, Kustgenese Fase 1, Deelrapport V, 1987.

Belangrijkste Symbolen

Symbol	omschrijving	dimensie
A	dimensieloze ruwheid ($A=r/h$)	$[-]$
C	Chézy coëfficiënt	$[L^{1/2} T^{-1}]$
C_1	coëfficiënt in de analytische benadering van de transport-kusthoek kromme	$[L^3 T^{-1}]$
C_2	coëfficiënt in de analytische benadering van de transport-kusthoek kromme	$[-]$
C_{90}	Chézy coëfficiënt gerelateerd aan de D_{90}	$[L^{1/2} T^{-1}]$
c	fase snelheid	$[LT^{-1}]$
D_{50}	korrel diameter die door 50% van de korrels in gewicht wordt overschreden	$[L]$
D_{90}	korrel diameter die door 10% van de korrels in gewicht wordt overschreden	$[L]$
E	golfenergie per oppervlakte eenheid	$[MT^{-2}]$
f_w	wrijvingscoëfficiënt	$[-]$
g	versnelling ten gevolge van de zwaartekracht	$[LT^{-2}]$
h	waterdiepte	$[L]$
h_p	profielhoogte	$[L]$
H_s	significante golfhoogte	$[L]$
i	verhang	$[-]$
Kr	refractie factor	$[-]$
Ks	shoaling factor	$[-]$
k	golfgetal ($k=2\pi/L$)	$[L^{-1}]$
L	golflengte	$[L]$
m	bodemhelling	$[-]$
n	verhouding groepsnelheid en fasesnelheid	$[-]$
$O_{y_{max}}$	maximum kustlijnverplaatsing	$[L]$
Q_{sa}	sedimenttransport	$[L^3 T^{-1}]$
r	bodemruwheid	$[L]$
S	sedimenttransport	$[L^3 T^{-1}]$
s_x	evenredigheidsconstante	$[L^3 T^{-1}]$
S_{yx}	schuifspanningscomponent van de golfspanning	$[MT^{-2}]$
T	tijdconstante	$[T]$
T_{m02}	karacteristieke periode golfspectrum	$[T]$
T_p	piekperiode	$[T]$
T^1	getijperiode	$[T]$
t	tijd	$[T]$
V	dieptegemiddelde stroomsnelheid	$[LT^{-1}]$
	sedimentvolume	$[L^3]$
w	deeltjes valsnelheid	$[LT^{-1}]$
x	coördinaat langs de kust	$[L]$
x^y	coördinaat langs de kust	$[L]$
x_r	coördinaat evenwijdig tegengesteld gericht aan de y-coördinaat	$[L]$
y	coördinaat loodrecht op de kustlijn	$[L]$
Z	waterstandverandering t.g.v. getij	$[L]$
z	Rouse getal	$[-]$
	verticale coördinaat	$[L]$
γ	breker-index	$[-]$
Δ	relatieve sedimentdichtheid	$[-]$
ζ	dimensieloze hoogte ($\zeta=z/h$)	$[-]$
θ	kusthoek	$[-]$
θ_a	evenwichtshoek	$[-]$
θ_g	kusthoek ($\theta_g = \tan(\theta) = \partial y / \partial x$)	$[-]$
θ_r	relatieve kusthoek ($\theta_r = \theta - \theta_a$)	$[-]$
κ	von Karman coëfficiënt ($\kappa=0,4$)	$[-]$
μ	ribbel factor ($\mu=C/C_{90}$) ³²	$[-]$
π	constante ($\pi=3,14159265$)	$[-]$
ρ	dichtheid water	$[ML^{-3}]$
τ_c	bodemschuifspanning bij stroming	$[ML^{-1}T^{-2}]$
τ_{cw}	bodemschuifspanning bij stroming en golven	$[ML^{-1}T^{-2}]$
τ_w	bodemschuifspanning bij golven	$[ML^{-1}T^{-2}]$
φ	faseverschil tussen horizontaal en verticaal getij	$[-]$
Ω	frequentie getijgolf	$[T^{-1}]$
ω	hoekfrequentie oppervlaktegolf ($\omega=2\pi/T$)	$[T^{-1}]$

Bijlage 1: Afleiding golfklimaat Petten

1. Afleiding golfklimaat Petten

1.1 Inleiding

De gegevens die in deze bijlage worden gebruikt zijn ontleend aan een studie van het Waterloopkundig Laboratorium, project Kustgenese (Van Rijn et al. 1995). In deze studie zijn gegevens vermeld voor o.a. Callantsoog (raai 14) en Egmond (raai 40). Deze raaien liggen respectievelijk ten noorden en ten zuiden van de Hondsbossche en Pettemer zeewering. In deze bijlage wordt met behulp van deze gegevens het golfklimaat voor de kust van Petten bepaald.

1.2 Golfpiekperiode van een golfveld

De golfpiekperiode van een golfveld wordt verkregen door de karakteristieke periode T_{m02} van het golfspectrum te vermenigvuldigen met 1,25. Dus piekperiode $T_p = 1,25 \cdot T_{m02}$.

De piekperiode wordt gemiddeld per golfhoogteklasse. Het blijkt dat de piekperioden per richting van raai 14 (Callantsoog) en raai 40 (Egmond) niet zoveel verschillen. Daarom is het gemiddelde van deze twee raaien genomen voor het golfklimaat voor de kust van Petten. Zie figuur 1.1 en figuur 1.2.

Raai 14 (Callantsoog)									
Sector t.o.v. kaartnoorden (graden)	0-30	180-210	210-240	240-270	270-300	300-330	330-360		
Richting t.o.v. zeewering (graden)	-84	81	57	27	-3	-33	-63	gem. T_{m02} (s)	piekperiode T_p (s)
Golfhoogteklasse H_s (m)	golfperiode T_{m02} (s)								
<0,50	3,78	3,78	3,70	3,79	3,84	3,83	3,70	3,77	4,7
0,50-1,00	4,25	4,12	4,08	4,19	4,30	4,36	4,33	4,23	5,3
1,00-1,50	4,79	4,51	4,51	4,65	4,76	4,83	4,81	4,69	5,9
1,50-2,00	5,20	4,86	4,90	5,01	5,12	5,24	5,21	5,08	6,3
2,00-2,50	5,64	5,23	5,29	5,39	5,51	5,62	5,58	5,46	6,8
2,50-3,00	6,07	5,63	5,66	5,77	5,92	6,03	6,02	5,87	7,3
3,00-3,50	6,49	5,89	6,03	6,14	6,23	6,46	6,50	6,25	7,8
3,50-4,00	6,56	6,38	6,40	6,51	6,69	6,84	6,84	6,60	8,3
4,00-4,50	7,25	6,60	6,80	6,87	7,00	7,31	7,21	7,01	8,8
>4,50	7,90	6,97	7,43	7,49	7,64	7,86	8,00	7,61	9,5

fig.1.1: Golf piekperioden bij Callantsoog

Raai 40 (Egmond)									
Sector t.o.v. kaartnoorden (graden)	0-30	180-210	210-240	240-270	270-300	300-330	330-360		
Richting t.o.v. zeewering (graden)	-84	81	57	27	-3	-33	-63	gem. T_{m02} (s)	piekperiode T_p (s)
Golfhoogteklasse H_s (m)	golfperiode T_{m02} (s)								
<0,50	3,77	3,78	3,69	3,80	3,85	3,82	3,72	3,78	4,7
0,50-1,00	4,20	4,07	4,07	4,19	4,29	4,36	4,33	4,22	5,3
1,00-1,50	4,70	4,45	4,48	4,62	4,73	4,78	4,75	4,65	5,8
1,50-2,00	5,08	4,82	4,89	5,00	5,10	5,19	5,14	5,03	6,3
2,00-2,50	5,56	5,21	5,28	5,39	5,49	5,58	5,54	5,44	6,8
2,50-3,00	5,99	5,59	5,67	5,77	5,91	6,01	5,97	5,85	7,3
3,00-3,50	6,43	5,83	6,00	6,17	6,24	6,44	6,45	6,22	7,8
3,50-4,00	6,48	6,36	6,43	6,51	6,66	6,82	6,77	6,58	8,2
4,00-4,50	7,15	6,60	6,82	6,88	6,98	7,24	7,13	6,97	8,7
>4,50	7,90	6,94	7,52	7,34	7,54	7,77	8,02	7,58	9,5

fig.1.2: Golf piekperioden bij Egmond

1.3 Significante golfhoogte van een golfveld

De significante golfhoogten van de golfvelden worden verdeeld in 10 golfhoogteklassen. Iedere golfhoogteklasse wordt gekarakteriseerd door een significante golfhoogte H_s . De kleinste klasse betreft golfvelden met een significante golfhoogte kleiner dan 0,50 m. De grootste klasse betreft golfvelden met een significante golfhoogte groter dan 4,50 m. In de berekening wordt de gemiddelde golfhoogte van de klasse gekozen. Zo wordt voor golfhoogteklasse $H_s=3,00-3,50$ m bijvoorbeeld $H_s=3,25$ m gekozen.

1.4 Gemiddelde hoek van golfinval en de duur van een golfveld

De hoek van inval aan de kust van een golfveld wordt weergegeven per sector van 30 graden. De sector wordt onderverdeeld in de 10 golfhoogteklassen. Per golfhoogteklasse en per sector is het percentage van voorkomen van een golfveld bekend. Voor de situatie bij Petten is het gemiddelde genomen van de gegevens van raai 14 en raai 40. Zie figuur 1.3 en figuur 1.4.

Raai 14 (Callantsoog)								
Sector t.o.v. kaartnoorden (graden)	0-30	180-210	210-240	240-270	270-300	300-330	330-360	
Golfhoogteklasse H_s (m)	percentage van voorkomen							totaal
<0,50	0,97	1,43	1,49	1,03	0,83	0,68	0,71	7,14
0,50-1,00	1,93	3,44	4,22	2,86	2,04	1,64	1,64	17,77
1,00-1,50	1,43	2,51	3,69	2,67	1,97	1,75	1,69	15,71
1,50-2,00	0,76	1,45	2,74	2,09	1,50	1,44	1,25	11,23
2,00-2,50	0,33	0,82	1,67	1,39	1,10	0,98	0,76	7,05
2,50-3,00	0,12	0,50	0,92	0,88	0,75	0,57	0,44	4,18
3,00-3,50	0,08	0,22	0,40	0,60	0,50	0,37	0,22	2,39
3,50-4,00	0,04	0,09	0,18	0,26	0,32	0,17	0,09	1,15
4,00-4,50	0,01	0,03	0,05	0,19	0,22	0,15	0,04	0,69
>4,50	0,02	0,01	0,02	0,22	0,29	0,15	0,05	0,76
Totaal %	5,69	10,50	15,38	12,19	9,52	7,90	6,89	68,07

fig.1.3: Percentage van voorkomen van golfhoogten per richtingssector bij Callantsoog

Raai 40 (Egmond)								
Sector t.o.v. kaartnoorden (graden)	0-30	180-210	210-240	240-270	270-300	300-330	330-360	
Golfhoogteklasse H_s (m)	percentage van voorkomen							totaal
<0,50	1,15	1,76	1,83	1,16	0,91	0,76	0,90	8,47
0,50-1,00	2,24	3,81	4,70	3,02	2,23	1,91	1,98	19,89
1,00-1,50	1,55	2,53	3,86	2,74	2,00	1,82	1,71	16,21
1,50-2,00	0,69	1,37	2,84	2,01	1,47	1,43	1,13	10,94
2,00-2,50	0,24	0,71	1,54	1,19	1,03	0,91	0,63	6,25
2,50-3,00	0,11	0,38	0,80	0,74	0,67	0,51	0,38	3,59
3,00-3,50	0,06	0,15	0,29	0,45	0,41	0,29	0,17	1,82
3,50-4,00	0,03	0,06	0,13	0,20	0,29	0,14	0,06	0,91
4,00-4,50	0,01	0,01	0,04	0,13	0,17	0,11	0,03	0,50
>4,50	0,01	0,01	0,02	0,14	0,21	0,11	0,04	0,54
Totaal %	6,09	10,79	16,05	11,78	9,39	7,99	7,03	69,12

fig.1.4: Percentage van voorkomen van golfhoogten per richtingssector bij Egmond

Voor het golfklimaat voor de kust van Petten zijn bovenstaande waarden gemiddeld. De jaarlijkse sedimenttransporten zijn nodig. Daarom worden de percentages vermenigvuldigd met 365 dagen. Omdat sector 0-30 niet geheel binnen het bereik valt van de sectorenverdeling maar slechts voor 12/30-ste is ook het aantal dagen met 12/30-ste vermenigvuldigd. Evenzo voor sector 180-210 met 18/30-ste. Dit geeft de volgende uitgangssituatie voor het profiel bij Petten. Zie figuur 1.5.

Golfklimaat Petten									
Sector t.o.v. kaartnoorden (graden)			0-30	180-210	210-240	240-270	270-300	300-330	330-360
Richting t.o.v. zeewering (graden)			-84	81	57	27	-3	-33	-63
Golfhoogteklasse H_s (m)	H_s (m)	T_p (s)	aantal dagen van voorkomen per jaar						
<0,50	0,25	4,7	1,5	5,8	6,1	4,0	3,2	2,6	1,8
0,50-1,0	0,75	5,3	3,0	13,2	16,3	10,7	7,8	6,5	4,0
1,0-1,5	1,25	5,9	2,2	9,2	13,8	9,9	7,2	6,5	3,7
1,5-2,0	1,75	6,3	1,1	5,1	10,2	7,5	5,4	5,2	2,6
2,0-2,5	2,25	6,8	0,4	2,8	5,9	4,7	3,9	3,4	1,5
2,5-3,0	2,75	7,3	0,2	1,6	3,1	3,0	2,6	2,0	0,9
3,0-3,5	3,25	7,8	0,1	0,7	1,3	1,9	1,7	1,2	0,4
3,5-4,0	3,75	8,3	0,1	0,3	0,6	0,8	1,1	0,6	0,2
4,0-4,5	4,25	8,8	0,0	0,1	0,2	0,6	0,7	0,5	0,1
>4,5	4,75	9,5	0,0	0,0	0,1	0,7	0,9	0,5	0,1
Aantal dagen/jaar			8,6	38,9	57,4	43,7	34,5	29,0	15,2
Totaal aantal dagen/jaar			227,3						

fig.1.5: Het aantal dagen van voorkomen van golfhoogteklasse per richtingssector per jaar

In totaal wordt de zeewering 227 dagen per jaar door golven aangevallen. 138 dagen per jaar zijn er geen golven of komen ze uit een andere richting (aflandige wind). Het volledige golfklimaat van Petten (golfklimaat 1) zonder horizontaal en verticaal getij is gegeven in figuur 1.6.

	hgetij (m)	H_s (m)	T_p (s)	alfa (graden)	duur (dagen)	Vgetij (m/s)	richting (graden)
1	0	0,25	4,7	-84	1,5	0	0-30
2	0	0,75	5,3	-84	3	0	
3	0	1,25	5,9	-84	2,2	0	
4	0	1,75	6,3	-84	1,1	0	
5	0	2,25	6,8	-84	0,4	0	
6	0	2,75	7,3	-84	0,2	0	
7	0	3,25	7,8	-84	0,1	0	
8	0	3,75	8,3	-84	0,1	0	
9	0	4,25	8,8	-84	0	0	
10	0	4,75	9,5	-84	0	0	
11	0	0,25	4,7	81	5,8	0	180-210
12	0	0,75	5,3	81	13,2	0	
13	0	1,25	5,9	81	9,2	0	
14	0	1,75	6,3	81	5,1	0	
15	0	2,25	6,8	81	2,8	0	
16	0	2,75	7,3	81	1,6	0	
17	0	3,25	7,8	81	0,7	0	
18	0	3,75	8,3	81	0,3	0	
19	0	4,25	8,8	81	0,1	0	
20	0	4,75	9,5	81	0	0	

fig.1.6: Golfklimaat Petten (golfsituaties 1 t/m 20)

Bijlage 2: Langtransport in de brandingszone ten gevolge van de getijstroom

2. Langtransport in de brandingszone ten gevolge van de getijstroom

2.1 Inleiding

In deze bijlage wordt beschreven hoe het langtransport in de brandingszone ten gevolge van de getijstroom kan worden berekend. Voor de berekening wordt gebruik gemaakt van het rekenprogramma MathCad 6.0

In paragraaf 2.2 wordt de schematisatie van een eenvoudig dwarsprofiel beschreven. In paragraaf 2.3 wordt een benadering gegeven van de snelheidsverdeling van de getijstroom. Tenslotte wordt in paragraaf 2.4 het langtransport ten gevolge van de getijstroom berekend.

2.2 Schematisatie van het dwarsprofiel

Het dwarsprofiel wordt geschematiseerd als een rechte lijn met een helling van 1:100. In figuur 2.1 is het dwarsprofiel, een doorsnede loodrecht op de kustlijn, weergegeven. Het gebruikte assenstelsel is gelijk aan het assenstelsel beschreven in figuur 2.3 in hoofdstuk 2. De y-as staat loodrecht op de kustlijn en is positief in zeewaartse richting. De x-as is evenwijdig aan de kustlijn. Het dwarsprofiel heeft een lengte van 525 m. De waterdiepte h op 525 m uit de kust is NAP-5.25 m.

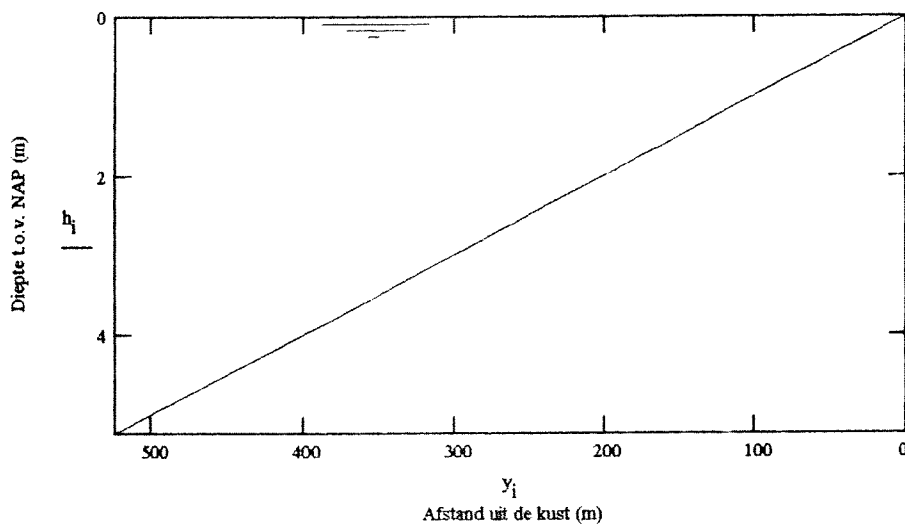


fig.2.1: Dwarsprofiel geschematiseerd als rechte lijn met helling 1:100

Voor de berekening is het noodzakelijk het dwarsprofiel onder te verdelen in een aantal "rekenpunten". In een "rekenpunt" kan het programma MathCad vervolgens de gevraagde grootheden berekenen. Het geschematiseerde dwarsprofiel wordt onderverdeeld in 31 "rekenpunten".

i	$y_i :=$	h_i
0	1	0.01
1	10	0.1
2	20	0.2
3	30	0.3
4	40	0.4
5	50	0.5
6	60	0.6
7	70	0.7
8	80	0.8
9	90	0.9
10	100	1
11	120	1.2
12	140	1.4
13	160	1.6
14	180	1.8
15	200	2
16	220	2.2
17	240	2.4
18	260	2.6
19	280	2.8
20	300	3
21	325	3.25
22	350	3.5
23	375	3.75
24	400	4
25	425	4.25
26	450	4.5
27	475	4.75
28	485	4.85
29	500	5
30	525	5.25

De "rekenpunten" liggen op de y-as en worden weergegeven door een y met een index i : y_i . De index i geeft het nummer van het "rekenpunt" aan. Het "rekenpunt" y_0 ligt 1 m uit de kustlijn. Het "rekenpunt" y_{30} ligt 525 m uit de kustlijn. In figuur 2.2 zijn de "rekenpunten" y_i en de berekende waterdiepten h_i (m) weergegeven.

De bodemhelling m is 1:100. De waterdiepte wordt berekend door de afstand uit de kustlijn te vermenigvuldigen met 0.01.

Berekening:

Aantal "rekenpunten" (-): $N := 30$ $i := 0..N$
 Bodemhelling m (-): $m := 0.01$
 Waterdiepte h_i t.o.v. NAP (m): $h_i := m \cdot y_i$

fig.2.2: De "rekenpunten" y_i en de berekende waterdiepte h_i (m)

2.3 Snelheidsverdeling van de getijstroom

De snelheidsverdeling van de getijstroom wordt vastgelegd door een bepaalde, bekende dieptegemiddelde stroomsnelheid, op een bepaalde afstand uit de kust, op te geven. In dit voorbeeld is de stroomsnelheid $V=1$ m/s op een referentiediepte van $h=3$ m.

Hydraulische randvoorwaarden:

Stroomsnelheid V (m/s) op	$V := 1$	Bodemruwheid r (m):	$r := 0.05$
referentiediepte $h[\text{iref}]$:	$\text{iref} := 20$	Dichtheid water ρ (kg/m ³):	$\rho := 1030$
Relatieve sedimentdichtheid Δ (-):	$\Delta := 1.57$	Von Karman coefficient κ (-):	$\gamma := 0.4$
Deeltjes valsnelheid D_{50} w (m/s):	$w := 0.025$	Korreldiameter (m):	$D_{50} := 0.0002$ $D_{90} := 0.0003$

Berekening snelheidsverdeling:

Chezy coefficient C (m^{1/2}/s): $C_1 := 18 \cdot \log\left(\frac{12 \cdot h_i}{r}\right)$

Berekening constante voor vastleggen stroomsnelheid V (m/s) op een referentiediepte $h[\text{iref}]$: $\text{const} := \frac{V}{C_{\text{iref}} \sqrt{h_{\text{iref}}}}$

Snelheidsverdeling volgens Chezy v (m/s): $v_i := \text{const} \cdot C_1 \cdot \sqrt{h_i}$

In figuur 2.3 is te zien dat de stroomsnelheid volgens deze benadering toeneemt met de afstand uit de kust. De maximum stroomsnelheid op ongeveer 500 m uit de kust is in dit voorbeeld ongeveer 1.5 m/s.

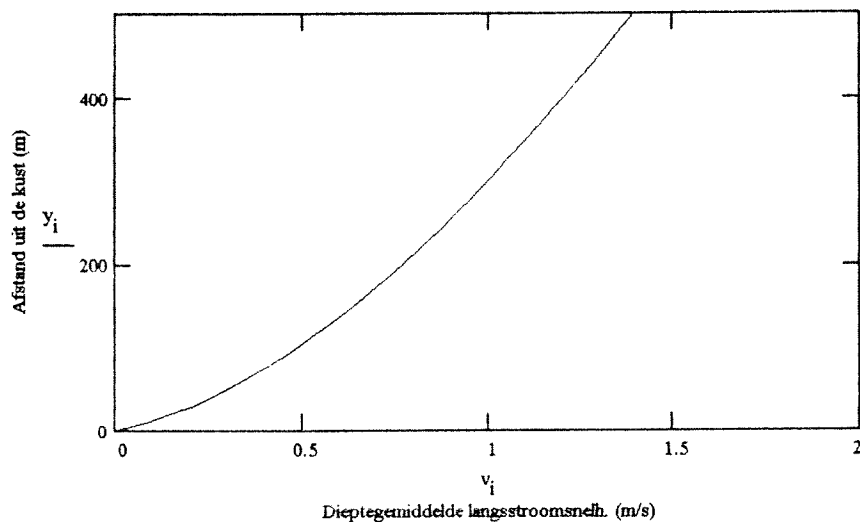


fig.2.3: Stroomsnelheidsverdeling als functie van de afstand uit de kust

2.4 Langtransport ten gevolge van de getijstroom

In deze paragraaf wordt het langtransport berekend dat wordt veroorzaakt door de in de vorige paragraaf beschreven stroomsnelheidsverdeling. In de berekening wordt uitgegaan van een brandingszone van 485 m. Berekend worden het bodemtransport het suspensietransport en het totale langtransport.

Berekening langtransport:

Brandingszone: $i = 28..1$

$$\text{Chezy coefficient } C \text{ (m}^{1/2}\text{/s): } C_i := 18 \cdot \log\left(\frac{12 \cdot h_i}{r}\right) \quad C90_i := 18 \cdot \log\left(\frac{12 \cdot h_i}{D90}\right)$$

$$\text{Ribbel factor } \mu: \quad \mu_i := \left(\frac{C_i}{C90_i}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$\text{Bodemschuifspanning voor stroming } \tau_c \text{ (N/m}^2\text{): } \quad \tau_{c_i} := \rho \cdot 9.81 \cdot \left(\frac{v_i}{C_i}\right)^2$$

$$\text{Bodemtransport } Sbc \text{ (m}^3\text{/m/s): } \quad Sbc_i := 3.9 \cdot D50 \cdot v_i \cdot \frac{\sqrt{9.81}}{C_i} \cdot \exp\left(\frac{-0.27 \cdot \Delta \cdot D50 \cdot \rho \cdot 9.81}{\mu_i \cdot \tau_{c_i}}\right)$$

Bijker coefficient = 3.9

$$\text{Bodem schuifspanningssnelheid (m/s): } \quad vsc_i := \sqrt{\frac{\tau_{c_i}}{\rho}}$$

Einstein-integralen en dimensieloze ruwheid A , hoogte ζ en Rouse-getal z :
(berekening suspensietransport)

$$A_i := \frac{r}{h_i} \quad z_i := \frac{w}{\zeta \cdot vsc_i}$$

$$I1_i := 0.216 \cdot \frac{(A_i)^{(z_i-1)}}{(1-A_i)^{z_i}} \cdot \int_{A_i}^1 \left(\frac{1-\zeta}{\zeta}\right)^{z_i} d\zeta \quad I2_i := 0.216 \cdot \frac{(A_i)^{(z_i-1)}}{(1-A_i)^{z_i}} \cdot \int_{A_i}^1 \left(\frac{1-\zeta}{\zeta}\right)^{z_i} \cdot \ln(\zeta) d\zeta$$

$$\text{Suspensietransport } Ssc \text{ (m}^3\text{/m/s): } \quad Q_i := \left(I1_i \cdot \ln\left(\frac{33}{A_i}\right) + I2_i\right) \quad Ssc_i := 1.83 \cdot Q_i \cdot Sbc_i$$

$$\text{Totaaltransport } Stotc \text{ (m}^3\text{/m/s): } \quad Stotc_i := Sbc_i + Ssc_i$$

$$\text{Totaaltransport in de brandingszone (inclusief porien) } Stotaal \text{ (m}^3\text{/s): } \quad b_i := y_i - y_{i-1} \quad Stotaal_i := Stotc_i \cdot b_i \quad \sum Stotaal = 0.0951$$

In de veronderstelde brandingszone wordt ongeveer $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$ sediment getransporteerd. Dit transport wordt veroorzaakt door de getijstroom. In figuur 2.4 is de verdeling van het langtransport te zien als functie van de afstand uit de kust. Het totale langtransport is opgebouwd uit het bodemtransport en het suspensietransport. In de figuur is te zien dat het suspensietransport het grootste aandeel heeft in het totale langtransport.

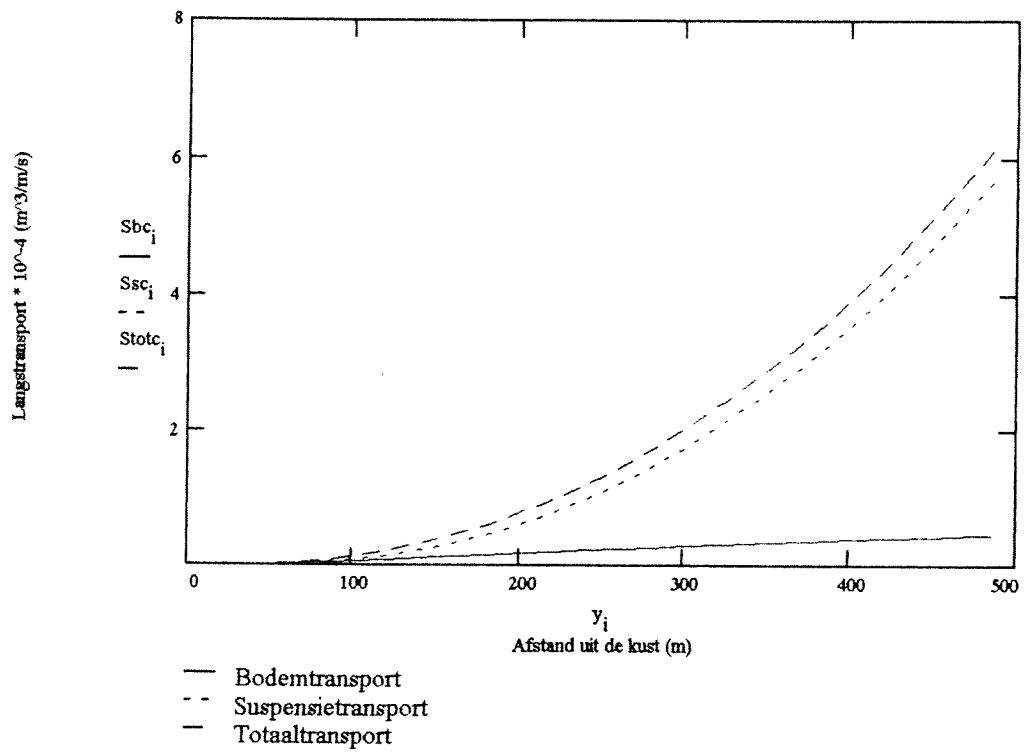


fig.2.4: De verdeling van het langtransport als functie van de afstand uit de kust

**Bijlage 3: Langtransport in de brandingszone ten gevolge van
een golfgeïnduceerde langsstroom**

3. Langtransport in de brandingszone ten gevolge van een golfgeïnduceerde langsstroom

3.1 Inleiding

In deze bijlage wordt beschreven hoe het langtransport in de brandingszone ten gevolge van een golfgeïnduceerde langsstroom kan worden berekend. Voor de berekening wordt gebruik gemaakt van het rekenprogramma MathCad 6.0. Ten einde de berekening zo overzichtelijk mogelijk te houden worden de hydraulische randvoorwaarden, benodigd voor de berekening, pas geïntroduceerd daar waar ze van toepassing zijn.

In paragraaf 3.2 wordt de schematisatie van een eenvoudig dwarsprofiel beschreven. In paragraaf 3.3 wordt met behulp van de lineaire golftheorie voor een golf met een hoogte van 3.25 m, die nadert richting de kust vanuit diep water, het verloop van de golfhoogte en de refractie berekend. Paragraaf 3.4 beschrijft de berekening van de golfgeïnduceerde langsstroom. Tenslotte wordt in paragraaf 3.5 het langtransport ten gevolge van de golfgeïnduceerde langsstroom berekend.

3.2 Schematisatie van het dwarsprofiel

Het dwarsprofiel wordt geschematiseerd als een rechte lijn met een helling van 1:100. In figuur 3.1 is het dwarsprofiel, een doorsnede loodrecht op de kustlijn, weergegeven. Het gebruikte assenstelsel is gelijk aan het assenstelsel beschreven in figuur 2.3 in hoofdstuk 2. De y-as staat loodrecht op de kustlijn en is positief in zeewaartse richting. De x-as is evenwijdig aan de kustlijn. Het dwarsprofiel heeft een lengte van 10 km. De waterdiepte op 10 km uit de kust is in dit voorbeeld NAP-100 m.

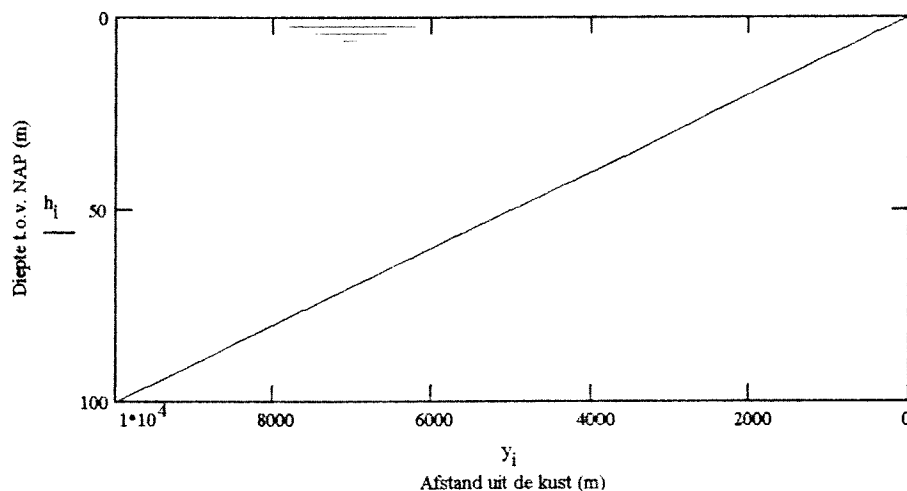


fig.3.1: Dwarsprofiel geschematiseerd als rechte lijn met helling 1:100

Voor de berekening is het noodzakelijk het dwarsprofiel onder te verdelen in een aantal "rekenpunten". In een "rekenpunt" kan het programma MathCad vervolgens de gevraagde grootheden berekenen. Het geschematiseerde dwarsprofiel wordt onderverdeeld in 41 "rekenpunten".

i	$y_i :=$	h_i
0	1	0.01
1	10	0.1
2	20	0.2
3	30	0.3
4	40	0.4
5	50	0.5
6	60	0.6
7	70	0.7
8	80	0.8
9	90	0.9
10	100	1
11	120	1.2
12	140	1.4
13	160	1.6
14	180	1.8
15	200	2
16	220	2.2
17	240	2.4
18	260	2.6
19	280	2.8
20	300	3
21	325	3.25
22	350	3.5
23	375	3.75
24	400	4
25	425	4.25
26	450	4.5
27	475	4.75
28	485	4.85
29	500	5
30	525	5.25
31	550	5.5
32	575	5.75
33	600	6
34	800	8
35	1000	10
36	2000	20
37	4000	40
38	6000	60
39	8000	80
40	10000	100

De "rekenpunten" liggen op de y-as en worden weergegeven door een y met een index i : y_i . De index i geeft het nummer van het "rekenpunt" aan. Het "rekenpunt" y_0 ligt 1 m uit de kustlijn. Het "rekenpunt" y_{40} ligt 10 km uit de kustlijn. In figuur 3.2 zijn de "rekenpunten" y_i en de berekende waterdiepten h_i (m) weergegeven.

De bodemhelling m is 1:100. De waterdiepte wordt berekend door de afstand uit de kustlijn te vermenigvuldigen met 0.01.

Berekening:

Aantal "rekenpunten" (-): $N := 40 \quad i := 0..N$
 Bodemhelling m (-): $m := 0.01$
 Waterdiepte h_i t.o.v. NAP (m): $h_i := m \cdot y_i$

fig.3.2: De "rekenpunten" y_i en de berekende waterdiepte h_i (m)

3.3 Berekening van golfhoogte en refractie

In deze paragraaf wordt voor een golfhoogte van 3.25 m het verloop van de golfhoogte en de refractie berekend wanneer de golven vanuit diep water de kust naderen. De hoek van golfinval, in diep water, ten opzichte van de normaal op de kust is 45 graden. De golfperiode is 7.8 s. Voor de breker-index wordt 0.6 aangehouden.

Hydraulische randvoorwaarden:

Golfperiode T (s):	T = 7.8	Golfhoogte in diep water H (m):	$H_N := 3.25$
Breker-index γ (-):	$\gamma = 0.6$	Hoek van golfinval θ_0 (graden):	$\theta_N := 45$
Dichtheid water ρ (kg/m ³):	$\rho = 1030$	Schatting golfengte L (m):	L := 90

Berekening:

Met behulp van de dispersierelatie wordt in ieder "rekenpunt" iteratief de golfengte berekend.

$$\text{Dispersierelatie: } \omega^2 = gk \tanh(kh) \text{ of: } L_i := \text{root} \left(L - \frac{9.81 \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \tanh \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h_i}{L} \right), L \right)$$

$$\text{(Hoek)frequentie (rad/s): } \omega := \frac{2 \cdot \pi}{T}$$

(periode blijft constant)

$$\text{Golfgetal k (rad/m): } k_i := \frac{2 \cdot \pi}{L_i}$$

$$\text{De factor n is een functie k en h (-): } n_i := \frac{k_i \cdot h_i}{\sinh(2 \cdot k_i \cdot h_i)} + \frac{1}{2}$$

$$\text{Fasesnelheid c (m/s): } c_i := \frac{L_i}{T}$$

$$\text{Shoaling factor } K_s \text{ (-): } K_{s_i} := \sqrt{\frac{1}{\tanh(k_i \cdot h_i) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot k_i \cdot h_i}{\sinh(2 \cdot k_i \cdot h_i)} \right)}}$$

Refractie factor K_r (-):

$$\text{De hoek van golfinval op diep water (n=0.5) in radialen: } \phi_N := \frac{\theta_N \cdot 2 \cdot \pi}{360} \quad j := (N - 1) .. 0$$

$$\phi_j := \text{asin} \left(\sin(\phi_i) \cdot \frac{c_j}{c_i} \right) \quad K_{r_j} = \frac{\cos(\phi_N)}{\cos(\phi_j)} \quad \theta_i := \frac{\phi_i \cdot 360}{2 \cdot \pi}$$

$$\text{Golfhoogte H (m): } H_j := \begin{cases} K_{s_j} \cdot K_{r_j} \cdot H_N & \text{if } \frac{K_{s_j} \cdot K_{r_j} \cdot H_N}{h_j} < \gamma \\ \gamma \cdot h_j & \text{otherwise} \end{cases}$$

In figuur 3.3 is het berekende verloop van de golfhoogte weergegeven als functie van de afstand uit de kust. De golfhoogte in diep water is 3.25 m. Wanneer de golven de kust naderen neemt de golfhoogte aanvankelijk af tot ongeveer 2.7 m. Vervolgens neemt de golfhoogte toe totdat de golven breken. In deze berekening is het moment van breken afhankelijk van de veronderstelde waarde van de breker-index γ . De golven breken als de golfhoogte ongeveer 2.9 m is. De afstand uit de kust is dan ongeveer 485 m. Vanaf het punt van breken tot aan de kustlijn wordt de golfhoogte lineair evenredig aan de waterdiepte verondersteld.

In figuur 3.4 is het berekende verloop van de hoek van golfinval als functie van de afstand uit de kust weergegeven. De hoek van golfinval neemt af van 45 graden in diep water tot 0 graden aan de kustlijn. Op de brekerlijn ($y=485$ m) is hoek van golfinval ongeveer 22 graden.

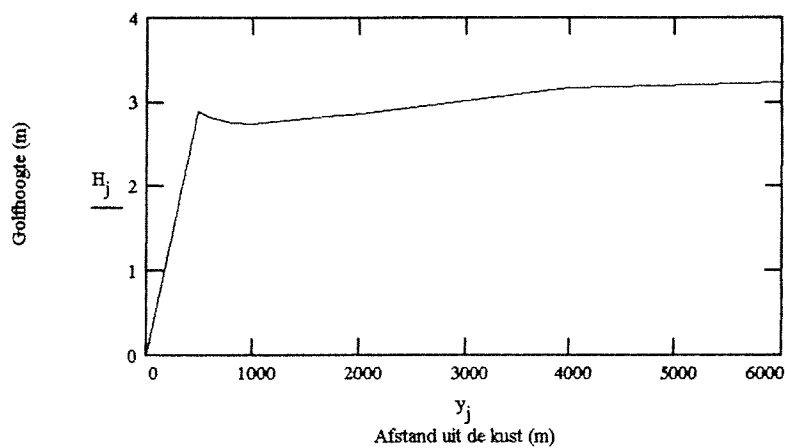


fig.3.3: Verloop van de golfhoogte als functie van de afstand uit de kust

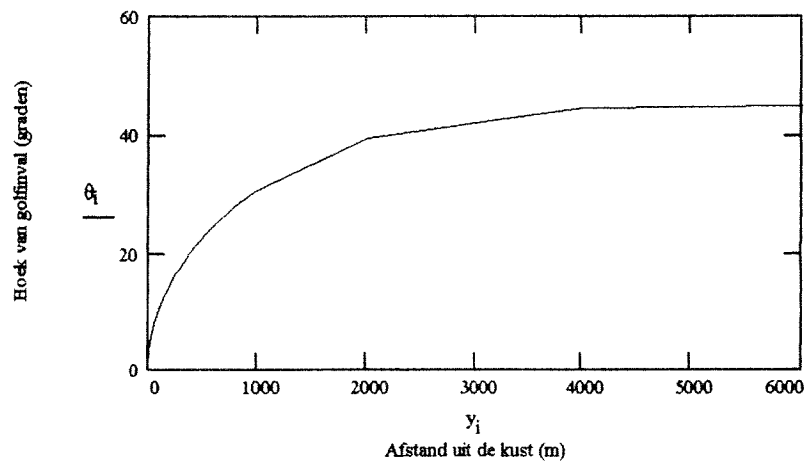


fig.3.4: Verloop van de hoek van golfinval als functie van de afstand uit de kust

In figuur 3.5 zijn voor de volledigheid de berekende waarden van waterdiepte, hoek van golfval en golfhoogte nogmaals weergegeven.

j	y_j	h_j	θ_j	H_j
39	8000	80	45	3.25
38	6000	60	44.96	3.24
37	4000	40	44.46	3.17
36	2000	20	39.51	2.86
35	1000	10	30.76	2.74
34	800	8	27.96	2.76
33	600	6	24.57	2.82
32	575	5.75	24.1	2.84
31	550	5.5	23.61	2.85
30	525	5.25	23.11	2.87
29	500	5	22.59	2.88
28	485	4.85	22.27	2.9
27	475	4.75	22.06	2.85
26	450	4.5	21.5	2.7
25	425	4.25	20.93	2.55
24	400	4	20.34	2.4
23	375	3.75	19.73	2.25
22	350	3.5	19.09	2.1
21	325	3.25	18.43	1.95
20	300	3	17.73	1.8
19	280	2.8	17.15	1.68
18	260	2.6	16.55	1.56
17	240	2.4	15.92	1.44
16	220	2.2	15.26	1.32
15	200	2	14.57	1.2
14	180	1.8	13.84	1.08
13	160	1.6	13.06	0.96
12	140	1.4	12.23	0.84
11	120	1.2	11.34	0.72
10	100	1	10.36	0.6
9	90	0.9	9.84	0.54
8	80	0.8	9.28	0.48
7	70	0.7	8.68	0.42
6	60	0.6	8.04	0.36
5	50	0.5	7.35	0.3
4	40	0.4	6.58	0.24
3	30	0.3	5.7	0.18
2	20	0.2	4.65	0.12
1	10	0.1	3.29	0.06
0	1	0.01	1.04	0.01

fig.3.5: De berekende waterdiepten h (m), hoeken van golfval θ (graden) en golfhoogten H (m) in de "rekenpunten" y_j

3.4 Berekening van de golfgeïnduceerde langsstroom

In deze paragraaf wordt de golfgeïnduceerde langsstroom berekend. Deze langsstroom wordt opgewekt door de golfspanning. De kustwaartse gradient van de golfspanningscomponent evenwijdig aan de kust is de drijvende kracht van deze langsstroom.

Eerst zal de golfspanningscomponent evenwijdig aan de kust S_{yx} worden berekend. Vervolgens wordt de golfspanningsgradient dS_{yx}/dy berekend. Voor de berekening van de bodemwrijving als weerstandsterm wordt Jonsson's wrijvingscoëfficiënt toegepast.

Berekening:

$$\text{Golfenergie in diep water (N/m): } E_N := \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot 9.81 \cdot (H_N)^2 \quad \phi_N = \frac{\theta_N \cdot 2 \cdot \pi}{360}$$

$$\text{Golfspanning evenwijdig aan de kust } S_{yx} \text{ (N/m): } S_{yx_j} := \begin{cases} \frac{1}{8} \cdot \frac{\sin(\phi_N)}{c_N} \cdot \rho \cdot 9.81 \cdot \gamma^2 \cdot \left[(h_j)^2 \cdot n_j \cdot c_j \cdot \cos(\phi_j) \right] & \text{if } j \leq 28 \\ E_N \cdot 0.5 \cdot \sin(\phi_N) \cdot \cos(\phi_N) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Golfspanningsgradient } dS_{yx}/dy \text{ (N/m/m): } dS_{yx_j} := \begin{cases} 0 & \text{if } S_{yx_j} \geq E_N \cdot 0.5 \cdot \sin(\phi_N) \cdot \cos(\phi_N) \\ \frac{5}{16} \cdot \rho \cdot \gamma^2 \cdot (9.81 \cdot h_j)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{\sin(\phi_N)}{c_N} \cdot m \right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

In figuur 3.6 wordt de golfspanning evenwijdig aan de kust weergegeven als functie van de afstand uit de kust. Alleen in de brandingszone, de zone van $y=0$ tot aan $y=485$ m, is de golfspanning evenwijdig aan de kust niet constant. In deze zone breken de golven en verliezen ze energie. Buiten de brandingszone wordt geen rekening gehouden met energie dissipatie, daar is de golfspanning evenwijdig aan de kust dan ook constant. Op de brekerlijn is de golfspanning evenwijdig aan de kust maximaal ongeveer 3370 N/m gemiddeld over de waterdiepte.

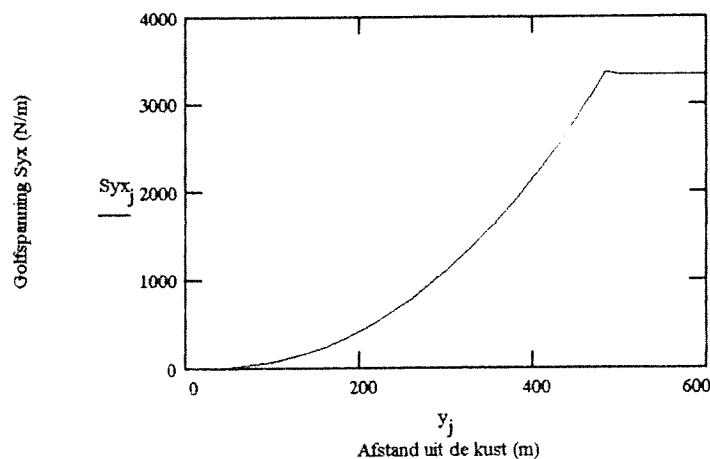


fig. 3.6: Golfspanning evenwijdig aan de kust

Figuur 3.7 geeft de golfspanningsgradient dS_{yx}/dy weer als functie van de afstand uit de kust. De maximum waarde is ongeveer 21 N/m/m. Dit is op de brekerlijn. Buiten de brandingszone is de golfspanningsgradient dS_{yx}/dy nul omdat S_{yx} daar constant is. In figuur 3.8 worden voor de volledigheid de berekende waarden nogmaals weergegeven.

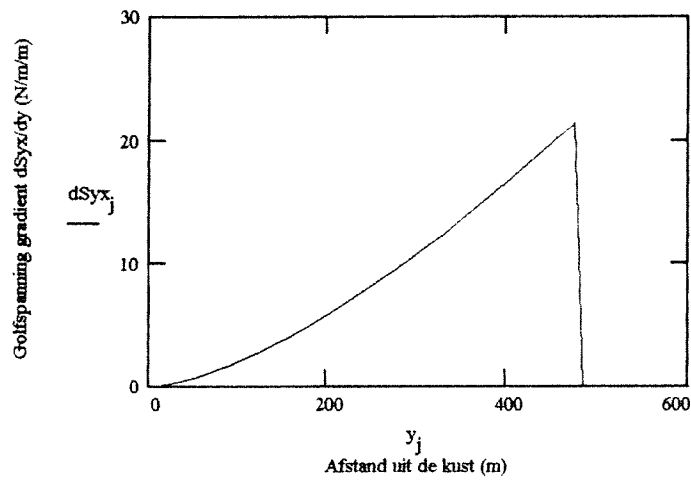


fig.3.7: Golfspanningsgradient dS_{yx}/dy (N/m/m)

$j := 30, 28 \dots 0$

j	y_j	S_{yx_j}	dS_{yx_j}
30	525	3335.2	0
28	485	3368.3	0
26	450	2841.8	19.7
24	400	2169.9	16.5
22	350	1593	13.5
20	300	1110.7	10.7
18	260	792.2	8.7
16	220	532.2	6.7
14	180	328.7	5
12	140	178.9	3.4
10	100	78.7	2.1
8	80	45.5	1.5
6	60	22.4	1
4	40	8.2	0.5
2	20	1.5	0.2
0	1	0	0

fig.3.8: De berekende golfspanning evenwijdig aan de kust S_{yx} (N/m) en de kustwaartse gradient van de golfspanning evenwijdig aan de kust dS_{yx}/dy (N/m/m) in de "rekenpunten" y_j

Gegevens voor de stroomsnelheidsverdeling:

Bodemruwheid r (m): $r := 0.05$ Von Karman coefficient κ (-): $\kappa := 0.4$
 Relatieve sedimentdichtheid Δ (-): $\Delta := 1.57$ Korreldiameter (m): $D_{50} := 0.0002$
 Deeltjes valsnelheid $D_{50} w$ (m/s): $w := 0.025$ $j := (N - 1) .. 0$ $D_{90} := 0.0003$

Berekening golfgeïnduceerde langsstroom: (alleen t.g.v. bodemwrijving en golfspanning)

Chezy coefficient C ($m^{1/2}/s$): $C_j := 18 \cdot \log\left(\frac{12 \cdot h_j}{r}\right)$

Maximum horizontale verplaatsing van een waterdeeltje net buiten de grenslaag a_{0j} (m): $a_{0j} := \frac{H_j}{2} \cdot \frac{1}{\sinh(k_j \cdot h_j)}$

Wrijvingscoëfficiënt f_w (-): (Jonsson) $f_{w_j} := \begin{cases} \exp\left[-5.977 + 5.213 \cdot \left(\frac{a_{0j}}{r}\right)^{-0.194}\right] & \text{if } \frac{a_{0j}}{r} > 1.59 \\ 0.30 & \text{otherwise} \end{cases}$

Langsstroomsnelheid v (m/s): (schuifspanning t.g.v. golven en stroom in de x-richting) $v_j := \begin{cases} 1.388 \cdot \left(\frac{\sin(\phi_N)}{c_N}\right) \cdot \frac{C_j}{\sqrt{f_{w_j}}} \cdot \gamma \cdot \sqrt{9.81 \cdot h_j} \cdot m & \text{if } j \leq 28 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

Figuur 3.9 geeft de dieptegemiddelde langsstroom snelheidsverdeling weer als functie van de afstand uit de kust. De maximum stroomsnelheid is ongeveer 2 m/s. In werkelijkheid zal door schuifspanning tussen waterdeeltjes in en net buiten de brandingszone ook direct buiten de brandingszone een langsstroom in dezelfde richting aanwezig zijn. De werkelijke stroomsnelheidsverdeling zal hierdoor een kleinere piek hebben en zal in een uitgestrekter gebied aanwezig zijn.

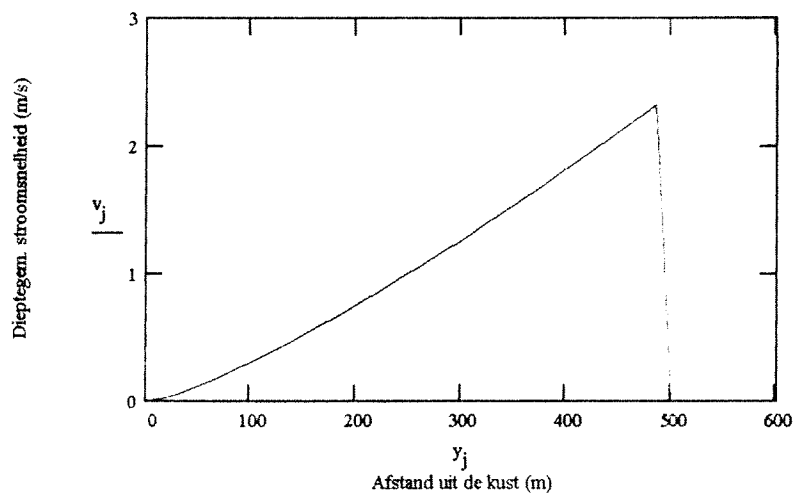


fig.3.9: De dieptegemiddelde langsstroomsnelheid als functie van de afstand uit de kust

3.5 Het langtransport ten gevolge van de golfgeïnduceerde langstroom

In deze paragraaf wordt het langtransport berekend dat wordt veroorzaakt door de in de vorige paragraaf beschreven stroomsnelheidsverdeling. Enkele grootheden zullen voor de overzichtelijkheid van de berekening nogmaals worden berekend.

Berekening sedimenttransport door golven en stroom:

$$j := 28..1$$

$$\text{Chezy coefficient } C \text{ (m}^{1/2}\text{/s): } \quad C_j := 18 \cdot \log\left(\frac{12 \cdot h_j}{r}\right) \quad C90_j := 18 \cdot \log\left(\frac{12 \cdot h_j}{D90}\right)$$

$$\text{Ribbel factor } \mu \text{ (-): } \quad \mu_j := \left(\frac{C_j}{C90_j}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$\text{Maximum horizontale snelheidscomponent net buiten de grenslaag } u_o \text{ (m/s): } \quad u_{oj} := \frac{\omega \cdot H_j}{2} \cdot \frac{1}{\sinh(k_j \cdot h_j)}$$

$$\text{Maximum horizontale verplaatsing van een waterdeeltje net buiten de grenslaag } a_o \text{ (m): } \quad a_{oj} := \frac{u_{oj}}{\omega}$$

$$\text{Wrijvingscoëfficiënt } f_w \text{ (-): } \quad f_{wj} := \begin{cases} \exp\left[-5.977 + 5.213 \cdot \left(\frac{a_{oj}}{r}\right)^{-0.194}\right] & \text{if } \frac{a_{oj}}{r} > 1.59 \\ 0.30 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{(Jonsson)}$$

$$\text{Maximum bodemschuifspanning voor golven } \tau_w \text{ (N/m}^2\text{): } \quad \tau_{wj} := \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f_{wj} \cdot (u_{oj})^2$$

$$\text{Bodemschuifspanning voor stroming } \tau_c \text{ (N/m}^2\text{): } \quad \tau_{cj} := \rho \cdot 9.81 \cdot \left(\frac{v_j}{C_j}\right)^2$$

$$\text{Tijds gemiddelde bodemschuifspanning voor stroming en golven } \tau_{cw} \text{ (N/m}^2\text{): } \quad \tau_{cwj} := \tau_{cj} + \frac{1}{2} \cdot \tau_{wj}$$

$$\text{Bodemtransport } S_{bcw} \text{ (m}^3\text{/m/s): } \quad S_{bcwj} := 2 \cdot D50 \cdot v_j \cdot \frac{\sqrt{9.81}}{C_j} \cdot \exp\left(\frac{-0.27 \cdot \Delta \cdot D50 \cdot \rho \cdot 9.81}{\mu_j \cdot \tau_{cwj}}\right) \quad \text{(Bijker coefficient = 2)}$$

$$\text{Bodemschuifspannings-snelheid (m/s): } \quad v_{scwj} := \sqrt{\frac{\tau_{cwj}}{\rho}}$$

Einstein-integralen en dimensieloze ruwheid A , hoogte z en Rouse-getal z :
(berekening suspensietransport)

$$A_j := \frac{r}{h_j} \quad z_j := \frac{w}{\gamma \cdot v_{scw_j}}$$

$$I1_j := 0.216 \cdot \frac{(A_j)^{(z_j-1)}}{(1-A_j)^{z_j}} \cdot \int_{A_j}^1 \left(\frac{1-\zeta}{\zeta} \right)^{z_j} d\zeta$$

$$I2_j := 0.216 \cdot \frac{(A_j)^{(z_j-1)}}{(1-A_j)^{z_j}} \cdot \int_{A_j}^1 \left(\frac{1-\zeta}{\zeta} \right)^{z_j} \cdot \ln(\zeta) d\zeta$$

$$\text{Suspensietransport } S_{scw} \text{ (m}^3\text{/m/s):} \quad Q_j := \left(I1_j \cdot \ln\left(\frac{33}{A_j}\right) + I2_j \right) \quad S_{scw_j} := 1.83 \cdot Q_j \cdot S_{bcw_j}$$

$$\text{Totaaltransport } S_{totcw} \text{ (m}^3\text{/m/s):} \quad S_{totcw_j} := S_{bcw_j} + S_{scw_j}$$

$$\text{Totaaltransport in de brekerzone} \quad b_j := y_j - y_{j-1} \quad \text{Stotaal}_j := S_{totcw_j} \cdot b_j \quad \sum \text{Stotaal} = 0.53$$

(volume inclusief porien) Stotaal (m³/s):

In de brandingszone wordt ongeveer 0.5 m³/s sediment getransporteerd. Dit transport wordt veroorzaakt door golven met een hoogte van 3.25 m die vanuit diep water onder een hoek van 45 graden de kust naderen. In figuur 3.10 is de verdeling van het langtransport te zien als functie van de afstand uit de kust. Het totale langtransport is opgebouwd uit het bodemtransport en het suspensietransport. In de figuur is te zien dat het suspensietransport het grootste aandeel heeft in het totale langtransport.

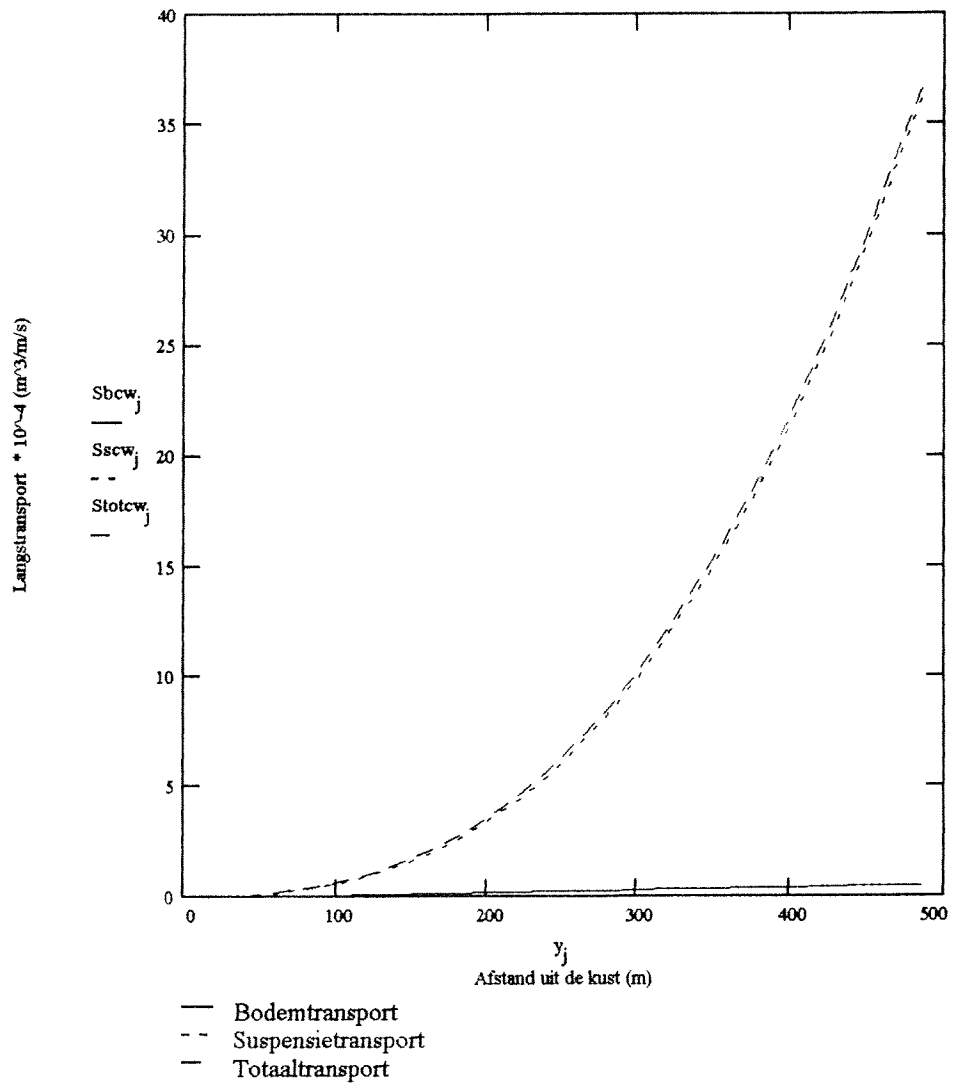


fig. 3.10: De verdeling van het langstransport als functie van de afstand uit de kust.

Bijlage 4: Invloed van het getij en de golven op het

sedimenttransport en op de transport-kusthoek

kromme

4. Invloed van het getij en de golven op het sedimenttransport en op de transport-kusthoek kromme

4.1 Inleiding

Het sedimenttransport langs de kust zal voornamelijk plaatsvinden in de brandingszone. Vooral de door de golven geïnduceerde langsstroom is verantwoordelijk voor het langtransport. Daarnaast zal het verticaal en het horizontaal getij invloed hebben op het langtransport. Wat de invloed van de golven op het langtransport is wordt beschreven in paragraaf 4.2. Wat de invloed van het verticaal getij op het langtransport is wordt beschreven in paragraaf 4.3. Wat de invloed van het horizontaal getij op het langtransport is wordt beschreven in paragraaf 4.4. In paragraaf 4.5 wordt de invloed van het getij en de golven op de transport-kusthoek kromme beschreven.

4.2 Invloed van de golven op het langtransport

Met behulp van het programma Unibest-LT wordt de invloed van de golven op het sedimenttransport onderzocht. De kusthoek werd bij de berekeningen niet gevarieerd. De invloeden van het getij zijn afwezig gelaten. Het sedimenttransport als functie van de hoek van golfval is berekend door de hoek van golfval van 0 tot 90 graden te laten variëren. Unibest-LT berekende het sedimenttransport bij deze hoeken. Door dit voor vier golfklassen, $H_s=4,75/3,25/1,75/0,25$ m, te doen was het mogelijk de invloed van een golfklasse op het totale sedimenttransport in de brandingszone te bepalen. Het blijkt dat een hoek van golfval van ongeveer 40 graden een maximaal sedimenttransport geeft. De resultaten zijn samengevat in figuur 4.1.

Raai 22				
Golfhoogteklasse H_s (m)	4,75	3,25	1,75	0,25
Hoek van golfval (graden)	sedimenttransport (m^3/s)			
0	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,76	0,27	0,04	0,00
20	1,38	0,49	0,06	0,00
30	1,78	0,64	0,08	0,00
40	1,93	0,69	0,09	0,00
50	1,79	0,64	0,08	0,00
60	1,38	0,50	0,06	0,00
70	0,79	0,30	0,04	0,00
80	0,21	0,10	0,01	0,00
90	0,00	0,00	0,00	0,00

fig.4.1: Het sedimenttransport per golfhoogteklasse en per hoek van golfval

In figuur 4.2, is duidelijk te zien dat de kleinere golfhoogteklassen relatief weinig sedimenttransport veroorzaken. Golfhoogteklasse $H_s=0,25$ m is niet in de grafiek opgenomen. Het langstransport veroorzaakt door deze golfhoogteklasse is verwaarloosbaar klein. Geconcludeerd kan worden dat van alle tien de golfhoogteklassen met name de drie kleinste golfhoogteklassen, $H_s=0,25/0,75/1,25$ m een zeer gering sedimenttransport veroorzaken. Voor alle golfhoogteklassen geldt dat bij een hoek van golfinval, ten opzichte van de normaal op de kust, van ongeveer 40 graden een maximaal langstransport optreedt.

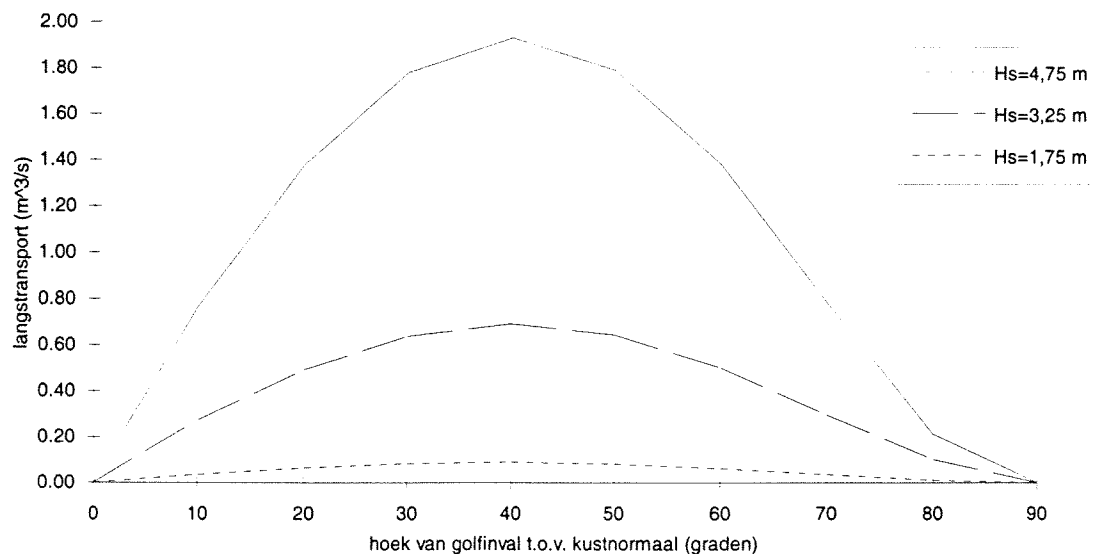


fig.4.2: Langstransport als functie van hoek van golfinval van golfhoogteklassen $H_s=4,75/3,25/1,75$ m

4.3 Invloed van het verticaal getij op het langstransport

In deze paragraaf wordt de invloed van het verticaal getij op het golfgeïnduceerde langstransport beschreven. Door Unibest-LT voor verschillende waterstanden het langstransport te laten berekenen werd het effect van de waterstand op het langstransport onderzocht. Door dit voor vier golfklassen, $H_s=4,75/3,25/1,75/0,25$ m, te doen was het mogelijk de invloed van de waterstand op het totale langstransport te bepalen. De hoek van golfinval werd gesteld op 40 graden. De kusthoek werd niet gevarieerd. In de berekeningen werd geen rekening gehouden met het horizontaal getij.

In figuur 4.3 zijn de resultaten samengevat. De relatie tussen waterstand en langstransport wordt in figuur 4.4 verduidelijkt. Het blijkt dat de waterstand van geringe invloed is op het langstransport. Golfhoogteklasse $H_s=4,75$ m geeft, als uitzondering, een toenemend sedimenttransport bij toenemende waterstand. Dit komt omdat bij deze golfhoogteklasse feitelijk ook transport plaatsvindt buiten NAP-11,5 m. Het langstransport, opgewekt door deze golfhoogteklasse, wordt bij een lage waterstand dus niet geheel in rekening gebracht. Een deel van de transportzone valt dan buiten het geschematiseerde dwarsprofiel. Met toenemende waterstand zal een groter deel, van de door deze golfhoogte opgewekte transportzone, binnen het geschematiseerde dwarsprofiel komen te liggen. Dit verklaart de toename van het totale langstransport bij toenemende waterstand bij golfhoogteklasse $H_s=4,75$ m.

Raai 22				
Golfhoogteklasse H_s (m)	4,75	3,25	1,75	0,25
Waterstand t.o.v. NAP (m)	sedimenttransport (m^3/s)			
-1,00	1,72	0,71	0,09	0,00
-0,75	1,78	0,70	0,09	0,00
-0,50	1,84	0,70	0,09	0,00
-0,25	1,89	0,70	0,09	0,00
0,00	1,93	0,69	0,09	0,00
0,25	1,96	0,68	0,09	0,00
0,50	1,99	0,67	0,08	0,00
0,75	2,02	0,66	0,08	0,00
1,00	2,03	0,64	0,07	0,00

fig.4.3: Sedimenttransport als functie van de waterstand

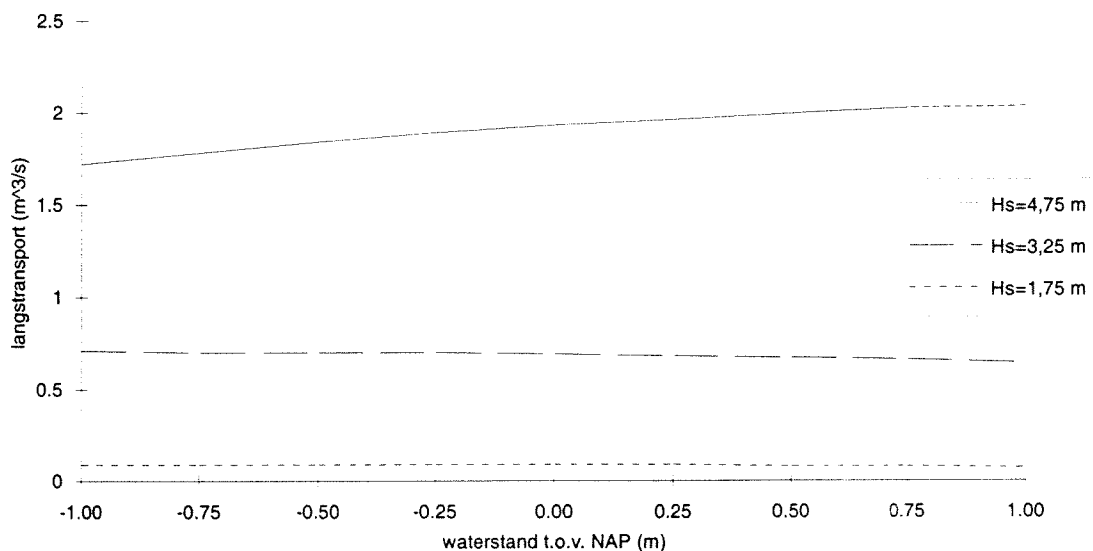


fig.4.4: Sedimenttransport als functie van de waterstand

4.4 Bijdrage van het horizontaal getij aan het sedimenttransport

In deze paragraaf wordt de bijdrage van het horizontaal getij aan het sedimenttransport beschreven. Bekeken is het sedimenttransport met en zonder langsstroom ten gevolge van het getij van 0,35 m/s. De waterstand is gelijk gesteld aan het NAP. De hoek van inval van de golfhoogteklassen waarbij ongeveer het maximum sedimenttransport optreedt, 40 graden, is gebruikt voor de berekeningen. Dit is gedaan voor alle tien de golfhoogteklassen. Bij een langsstroom van 0 m/s ten gevolge van het getij, wordt het sedimenttransport veroorzaakt door de langsstroom opgewekt door de kustwaartse gradiënt van de golfspanningscomponent evenwijdig aan de kust. Indien ook een getijstroom aanwezig is van 0,35 m/s zal het totale sedimenttransport toenemen. Hoe groot het aandeel is van het golfgeïnduceerde langstransport op het totale langstransport is te zien in figuur 4.5.

Raai 22			
Golfhoogteklasse	langstransport (m^3/s) bij een langsstroom t.g.v. het getij van :		aandeel golfgeïnduceerd langstransport t.o.v. totaal langstransport (-)
	(1): 0 (m/s)	(2): 0,35 (m/s)	
4,75	1,92	2,05	0,94
4,25	1,47	1,60	0,92
3,75	1,06	1,18	0,90
3,25	0,69	0,79	0,87
2,75	0,40	0,49	0,82
2,25	0,20	0,27	0,73
1,75	0,09	0,14	0,64
1,25	0,03	0,06	0,50
0,75	0,00	0,01	0,29
0,25	0,00	0,00	0,25

fig.4.5: Aandeel van het golfgeïnduceerd langstransport ten opzichte van het totale langstransport

In figuur 4.6 en 4.7, is te zien dat de langsstroom ten gevolge van het getij weinig invloed heeft op het totale sedimenttransport. Bij voornamelijk de grotere golfhoogteklassen blijkt dat een langsstroom ten gevolge van het getij niet veel bijdraagt aan het langstransport. Indien de hoek van golfinval groter of kleiner is dan 40 à 45 graden dan zal de door de golven geïnduceerde langsstroom afnemen. De invloed van de langsstroom ten gevolge van het getij op de totale langsstroom neemt dan toe.

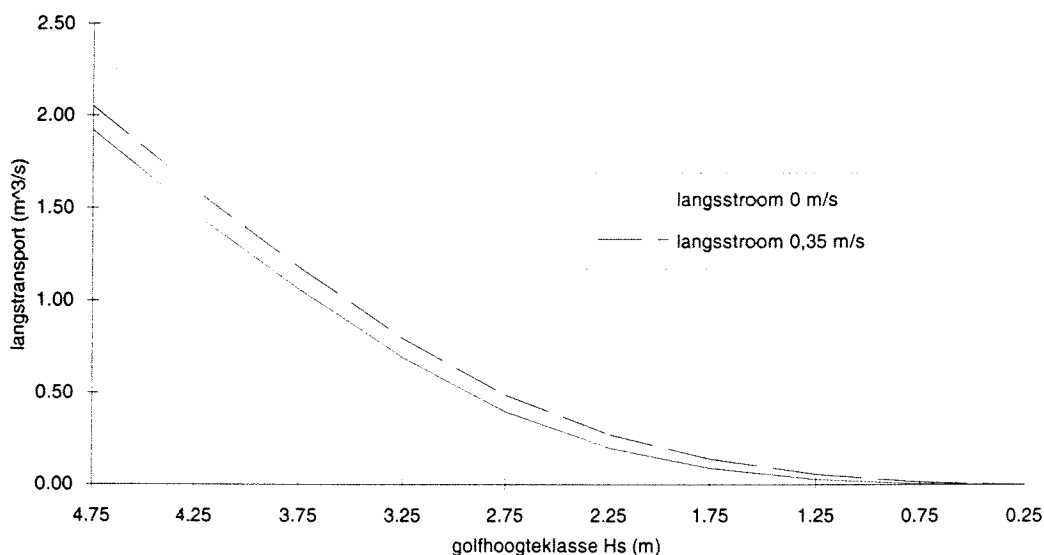


fig.4.6: Het sedimenttransport (m^3/s) met en zonder langsstroom ten gevolge van het getij van 0,35 m/s per golfhoogteklasse

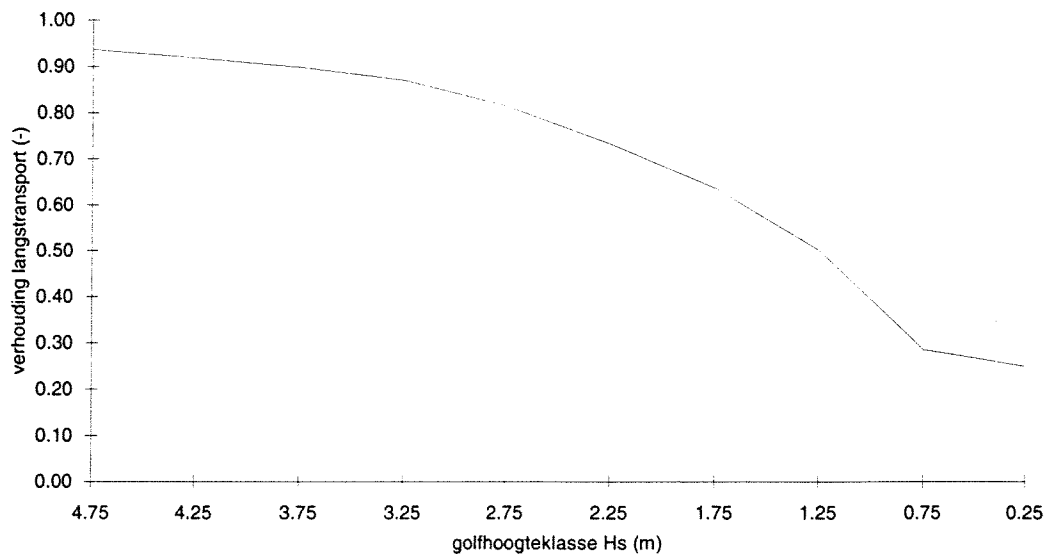


fig.4.7: Verhouding tussen de langstransporten: Langstransport zonder getijstroom ten opzichte van langstransport met een getijstroom van 0,35 m/s per golfhoogteklasse

4.5 Invloed van het getij en de golven op de transport-kusthoek kromme

Het golfklimaat van Petten, hier golfklimaat 1 genoemd, zoals beschreven in bijlage 1, wordt in deze paragraaf gebruikt om het effect van het getij en de golven op de transport-kusthoek kromme te analyseren.

Het is gebleken dat de drie kleinste golfhoogteklassen $H_s=0,25/0,75/1,25$ m zeer weinig sedimenttransport veroorzaken (figuur 4.2). Maar wordt de duur van voorkomen per jaar in betrekking genomen dan blijkt de invloed van de kleinere golfklassen niet verwaarloosbaar. Worden deze golfhoogteklassen weggelaten uit golfklimaat 1, dan berekent Unibest-LT de coëfficiënten van (5.1) zoals te zien is in figuur 4.8 voor golfklimaat 2.

Worden naast de drie kleinste golfhoogteklassen $H_s=0,25/0,75/1,25$ m de golven met een duur van voorkomen van kleiner dan 0,1 dagen verwaarloosd dan berekent Unibest-LT de coëfficiënten van (5.1) zoals te zien is in figuur 4.8 voor golfklimaat 3.

Golfklimaat 3 heeft een duur van 88,6 dagen per jaar. Het getij is echter continu aanwezig. Het jaar wordt aangevuld met 12 getijstappen van 23 dagen per stap. Unibest-LT berekent voor dit golfklimaat de coëfficiënten van (5.1) zoals te zien is in figuur 4.8 voor golfklimaat 4.

golfklimaat	evenwichtshoek θ_e (graden)	C_1	C_2
1	16,6	-0,0267	0,0119
2	15,2	-0,0263	0,0121
3	14,6	-0,0273	0,0124
4	15,5	-0,0262	0,0121

fig.4.8: Vergelijking van de door Unibest-LT berekende coëfficiënten

Wat het effect van de coëfficiënten op de transport-kusthoek kromme is, is te zien in figuur 4.9 waarin alle vier de krommen zijn weergegeven. In de figuur is te zien dat alle vier de golfklimaten vrijwel dezelfde transport-kusthoek kromme hebben. In dit onderzoek is voor het golfklimaat van Petten (golfklimaat 1) gekozen.

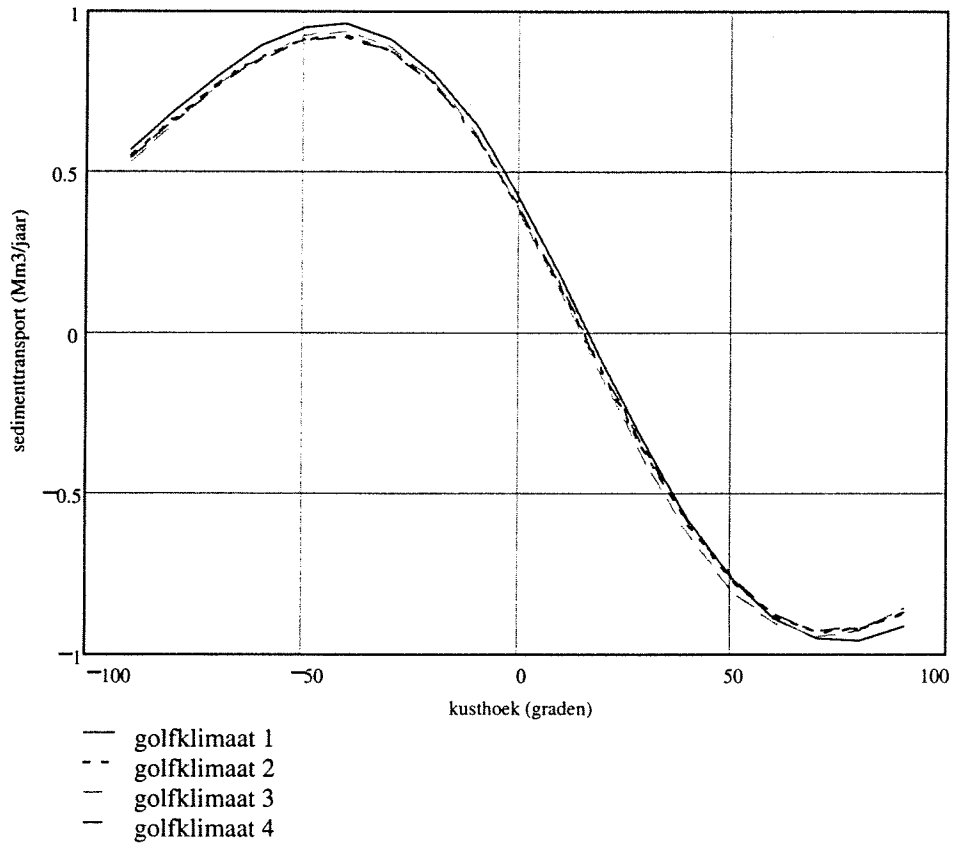


fig.4.9: De transport-kusthoek krommen van de vier golfklimaten